

Krzysztof Turek

Department of Transport and Information Technology, WSB University / Katedra Transportu i Informatyki, Akademia WSB  
Corresponding author / Autor korespondencyjny: krzysztof.turek@wsb.edu.pl

## The Use of Secondlife Cells for Building Energy Storage Devices. Safety and Threats

### Wykorzystanie używanych ogniw w budowie magazynów energii. Bezpieczeństwo i zagrożenia

#### ABSTRACT

**Aim:** The article presents the concept of reusing lithium-ion cells to build energy storage facilities, thereby reducing environmental pollution caused by the extraction of rare earth metals and reducing CO<sub>2</sub> emissions. The author discusses the environmental and economic potential of this solution, identifies key risks, and defines a strategy for mitigating them.

**Introduction:** In an era of rapid development of mobile technologies, electromobility, and renewable energy sources, individual countries are seeing a rapid increase in the production of energy storage facilities and storage capacities. Changes are also visible in the market for recycled cells. In this paper, the author points to the need to seek solutions that will enable better use of cells and reduce environmental degradation caused by the extraction of raw materials needed for the production of new batteries. One of the most promising areas of activity is the reuse of lithium-ion cells in the so-called "second life batteries". These cells can still be used effectively in energy storage systems. The article presents the ways in which individual countries encourage such activities.

**Methodology:** The article employs an analysis of scientific literature presenting the risks associated with lithium-ion cells, legal documents, business studies, statistics, and a review of new guidelines and financial incentives to increase the use of recycled cells.

**Conclusions:** The market for recycled cells will grow year on year due to the increasing production of lithium-ion batteries, but also due to the number of batteries withdrawn from the market that no longer maintain the required parameters. Batteries can be given a second life by using them, for example, in energy storage facilities that power data centres or stabilize power grids. The key aspects are ensuring safety, conducting appropriate cell tests before reuse, and selecting high-quality SMART BMS battery management systems to minimize the risks associated with warehouse operations.

**Keywords:** safety, recycling, lithium-ion cells

**Type of article:** review article

---

Received: 16.09.2025; Reviewed: 21.10.2025; Accepted: 14.11.2025;

Author's ORCID ID: 0009-0006-7958-5065;

Please cite as: SFT Vol. 66 Issue 2, 2025, pp. 74–96, <https://doi.org/10.12845/sft.66.2.2025.5>;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

---

#### ABSTRAKT

**Cel:** Artykuł przedstawia koncepcję ponownego wykorzystania ogniw litowo-jonowych do budowy magazynów energii, aby w ten sposób zniwelować zanieczyszczenie środowiska powstałe wskutek wydobycia metali ziem rzadkich oraz zmniejszyć emisję CO<sub>2</sub>. Autor omawia potencjał środowiskowy i ekonomiczny tego rozwiązania, identyfikuje kluczowe zagrożenia oraz definiuje strategię ich ograniczania.

**Wprowadzenie:** W dobie dynamicznego rozwoju technologii mobilnych, elektromobilności oraz odnawialnych źródeł energii w poszczególnych krajach obserwuje się gwałtowny wzrost produkcji magazynów energii oraz mocy magazynowania. Widoczne są także zmiany zachodzące na rynku ogniw z recyklingu. W niniejszej pracy autor wskazuje na konieczność poszukiwania rozwiązań, które umożliwią lepsze wykorzystanie ogniw i ograniczą degradację środowiska z powodu wydobycia surowców potrzebnych do produkcji nowych baterii. Jednym z najbardziej perspektywicznych kierunków działań jest ponowne wykorzystanie ogniw litowo-jonowych w tzw. „drugim życiu” (ang. *second life batteries*). Ogniwa te wciąż mogą być efektywnie stosowane w systemach magazynowania energii. Artykuł przedstawia sposoby, w jaki poszczególne państwa zachęcają do takiego działania.

**Metodologia:** W ramach pracy nad artykułem wykorzystano analizę literatury naukowej, w której przedstawiono zagrożenia związane z ogniwami litowo-jonowymi, dokumentów prawnych, opracowań biznesowych, statystyk oraz przegląd nowych wytycznych oraz zachęt finansowych do zwiększenia wykorzystania potencjału ogniw z odzysku.

**Wnioski:** Rynek ogniw z odzysku będzie rósł z roku na rok poprzez coraz większą produkcję baterii litowo-jonowych, ale także liczbę wycofywanych baterii z rynku, które już nie utrzymują odpowiednich parametrów. Bateriom można nadać drugie życie poprzez wykorzystanie ich np. w magazynach energii zasilających centra danych czy stabilizujących sieci energetyczne. Kluczowym aspektem jest dbałość o bezpieczeństwo, odpowiednie testy ogniw przed ponownym wykorzystaniem, dobór wysokiej jakości systemów zarządzania bateriami SMART BMS – tak aby zminimalizować ryzyko związane z działaniem magazynu.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo, odzysk, ogniwa litowo-jonowe

**Typ artykułu:** artykuł przeglądowy

**Przyjęty:** 16.09.2025; **Zrecenzowany:** 21.10.2025; **Zaakceptowany:** 14.11.2025;

Identyfikator ORCID autora: 0009-0006-7958-5065;

**Proszę cytować:** SFT Vol. 66 Issue 2, 2025, pp. 74–96, <https://doi.org/10.12845/sft.66.2.2025.5>;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

## Introduction

In an era of rapid development in energy technologies and growing environmental awareness, energy storage is becoming a key element of the energy transition. One promising direction is the use of recycled cells in the construction of energy storage facilities. This approach not only contributes to the reduction of electronic waste, but also lowers production costs, which is particularly important in the context of promoting renewable energy sources. The discovery of chemical cells has revolutionized our lives [1–8]. One of the main goals in the development of lithium-ion technology is to increase energy density, i.e. the amount of energy that a battery can store per unit of mass or volume [9]. Due to advances in electrode materials and electrolytes, the energy density of lithium-ion batteries is constantly increasing. New anode materials (such as silicon) and cathode materials (such as nickel and manganese oxides) allow for increased battery capacity [10–11].

Safety is a key aspect of lithium-ion technology. New materials and cell designs (e.g. lithium iron phosphate LiFePO<sub>4</sub> cells) reduce the risk of overheating and spontaneous combustion [12]. Battery management systems (BMS) allow the monitoring and control of battery operating parameters, which increases safety of use [13].

The development of lithium-ion battery recycling technology is key to closing the material loop [14]. Energy production from renewable energy sources (RES), such as photovoltaics and wind turbines, is growing rapidly year on year, contributing to the energy transition and reducing greenhouse gas emissions [15–16]. However, ensuring the stability of the energy system through the development of energy storage technologies and the modernization of transmission networks will be crucial. The growth in stored energy worldwide in recent years has been dynamic and is driven by the increasing demand for flexibility in energy systems, especially in the context of increasing the share of RES in the energy mix [17]. In 2025, the power of lithium-ion batteries may increase by approx. 30–40 GW, and their energy capacity by 100–150 GWh [18]. Lithium-ion batteries are used in energy storage for renewable energy sources, grid stabilization, and in home systems (e.g., Tesla's Powerwall). As we know, solar and wind energy are variable, so with the increase in the share of renewable energy sources, it is becoming necessary to store energy in order to stabilize the grid. In 2024, renewable energy sources

## Wstęp

W dobie dynamicznego rozwoju technologii energetycznych oraz rosnącej świadomości ekologicznej, magazynowanie energii staje się kluczowym elementem transformacji energetycznej. Jednym z obiecujących kierunków jest wykorzystanie do budowy magazynów energii ogniw pochodzących z odzysku. Takie podejście nie tylko przyczynia się do redukcji odpadów elektronicznych, ale także obniża koszty produkcji, co jest szczególnie istotne w kontekście upowszechniania odnawialnych źródeł energii. Odkrycie ogniw chemicznych zrewolucjonizowało nasze życie [1–8]. Jednym z głównych celów rozwoju technologii litowo-jonowych jest zwiększenie gęstości energii, czyli ilości energii, jaką bateria może zmagazynować na jednostkę masy lub objętości [9]. Dzięki postępowi w materiałach elektrodowych i elektrolitach, gęstość energii baterii litowo-jonowych stale rośnie. Nowe materiały anodowe (takie jak krzem) oraz katodowe (takie jak tlenki niklu i manganu) pozwalają na zwiększenie pojemności baterii [10–11].

Kluczowym aspektem technologii litowo-jonowych jest bezpieczeństwo. Nowe materiały i konstrukcje ogniw (np. ogniwa litowo-żelazowo-fosforanowe LiFePO<sub>4</sub>) zmniejszają ryzyko przegrzania i samozapłonu [12]. Systemy zarządzania baterią (BMS) pozwalają na monitorowanie i kontrolowanie parametrów pracy baterii, co zwiększa bezpieczeństwo użytkowania [13].

Rozwój technologii recyklingu baterii litowo-jonowych jest kluczowy dla zamknięcia obiegu materiałów [14]. Produkcja energii z odnawialnych źródeł energii (OZE), takich jak fotowoltaika i turbiny wiatrowe, notuje z roku na rok dynamiczny wzrost, przyczyniając się do transformacji energetycznej i zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych [15–16]. Bardzo ważne będzie jednak zapewnienie stabilności systemu energetycznego poprzez rozwój technologii magazynowania energii oraz modernizację sieci przesyłowych. Przyrost magazynowanej energii na świecie w ostatnich latach jest dynamiczny i wynika z rosnącego zapotrzebowania na elastyczność systemów energetycznych, zwłaszcza w kontekście zwiększania udziału OZE w miksie energetycznym [17]. W 2025 roku moc baterii litowo-jonowych może wzrosnąć o ok. 30–40 GW, a pojemność energetyczna o 100–150 GWh [18]. Baterie litowo-jonowe znajdują zastosowanie w magazynach energii dla OZE, stabilizacji sieci oraz w systemach domowych (np. Powerwall Tesli). Jak wiadomo, energia słoneczna i wiatrowa są zmienne, dlatego ze

accounted for approximately 30–35% of global electricity production. The lack of such stability can lead to power failures, such as the one that occurred in Portugal and Spain on April 28, 2025 [19]. China is the largest energy storage market, driven by the development of renewable energy sources and government policy. In 2024, it accounted for approximately 40% of global storage capacity growth [18]. The United States, with strong federal and state support (e.g., the Inflation Reduction Act), is promoting investment in energy storage [20]. The European Union is striving to increase the flexibility of its energy system as part of the Green Deal. In 2024, Europe commissioned approximately 5–10 GW of new storage capacity [18]. Tesla is collaborating with companies such as Panasonic and CATL (Contemporary Amperex Technology Co. Limited) to develop batteries with higher energy density and lower costs, such as 4680 batteries. CATL is developing LFP batteries with high durability and low costs and is working on sodium batteries as an alternative to Li-Ion [21] (Li-Ion in this article refers to a typical Li-Ion cell with an NMC cathode). LG Chem is developing NCMA batteries with lower cobalt content [22]. The development of lithium-ion batteries over the past few decades has led to their widespread use in electronics, transportation, and energy [23–24]. Current key trends include increasing energy density, improving safety, reducing costs, and extending service life. The future of lithium-ion batteries may lie in technologies such as solid-state, Li-S, and Li-air, which promise to further revolutionize energy storage. Key players such as Tesla, CATL, and LG Chem continue to drive innovation in this field, contributing to the energy transition and the development of sustainable technologies.

## The market for recycled cells

The recycled cell market refers to the sector of the economy that deals with the recovery, processing, and reuse of materials from used cells, rechargeable and non-rechargeable batteries. This is an increasingly important area due to the growing demand for energy storage technologies such as lithium-ion batteries and the need to protect the environment by reducing waste and recovering valuable raw materials. The market for recycled cells is growing rapidly, driven by both regulatory requirements and growing demand for sustainable energy solutions. According to reports by the International Renewable Energy Agency (IRENA), the global cell recycling market could reach a value of up to \$23 billion by 2030, driven by the increasing number of lithium-ion batteries being taken out of service, particularly in the automotive sector [25].

Bloomberg NEF (New Energy Finance), also known as BNEF, is a globally recognized research organization specializing in the analysis and research of renewable energy markets, including energy storage and energy technologies. It stands out as an independent source of information and analysis used by companies, investors, and government organizations across the energy sector. According to its data, battery production capacity

względem na wzrost udziału OZE konieczne stają się magazynowanie energii w celu stabilizacji sieci. W 2024 roku OZE odpowiadało za ok. 30–35% globalnej produkcji energii elektrycznej. Brak takiej stabilności może doprowadzić do awarii zasilania, takiej jak ta, która miała miejsce w Portugalii i Hiszpanii 28 kwietnia 2025 roku [19]. Największym rynkiem magazynowania energii, napędzanym przez rozwój OZE i politykę rządową, są Chiny. W 2024 roku odpowiadały one za ok. 40% globalnego przyrostu mocy magazynowania [18]. Stany Zjednoczone z silnym wsparciem federalnym i stanowym (np. Inflation Reduction Act) promują inwestycje w magazyny energii [20]. Unia Europejska dąży do zwiększenia elastyczności systemu energetycznego w ramach Zielonego Ładu. W 2024 roku Europa oddała ok. 5–10 GW nowych mocy magazynowych [18]. Tesla współpracuje z firmami, takimi jak Panasonic i CATL (ang. Contemporary Amperex Technology Co. Ltd.) nad rozwojem baterii o wyższej gęstości energii i niższych kosztach, takich jak baterie 4680. CATL rozwija baterie LFP o wysokiej trwałości i niskich kosztach oraz prowadzi prace nad bateriami sodowymi jako alternatywą dla Li-Ion [21] (Li-Ion w niniejszym artykule oznacza typowe ogniwo Li-Ion z katodą klasy NMC). LG Chem rozwija baterie NCMA z mniejszą zawartością kobaltu [22]. Rozwój baterii litowo-jonowych w ciągu ostatnich kilkunastu lat doprowadził do ich powszechnego zastosowania w elektronice, transporcie i energetyce [23–25]. Obecnie kluczowe trendy to zwiększenie gęstości energii, poprawa bezpieczeństwa, obniżenie kosztów i wydłużenie żywotności. Przyszłość baterii litowo-jonowych może być związana z technologiami, takimi jak solid-state, Li-S czy Li-air, które obiecują dalszą rewolucję w magazynowaniu energii. Kluczowi gracze, tacy jak Tesla, CATL i LG Chem, nadal napędzają innowacje w tej dziedzinie, przyczyniając się do transformacji energetycznej i rozwoju zrównoważonych technologii.

## Rynek ogniw z recyklingu

Rynek ogniw z recyklingu odnosi się do sektora gospodarki, który zajmuje się odzyskiwaniem, przetwarzaniem i ponownym wykorzystaniem materiałów z zużytych ogniw, baterii ogniw ładowanych i nieładowanych. Jest to coraz ważniejszy obszar ze względu na rosnące zapotrzebowanie na technologie magazynowania energii, takie jak baterie litowo-jonowe, oraz konieczność ochrony środowiska poprzez redukcję odpadów i odzyskiwanie cennych surowców. Rynek ogniw pochodzących z recyklingu dynamicznie rozwija się, napędzany zarówno przez regulacje prawne, jak i rosnące zapotrzebowanie na zrównoważone rozwiązania energetyczne. Według raportów Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej (IRENA) globalny rynek recyklingu ogniw może osiągnąć wartość nawet 23 miliardów dolarów do 2030 roku, co wynika z coraz większej liczby wycofywanych z użytku baterii litowo-jonowych, szczególnie sektora motoryzacyjnego [25].

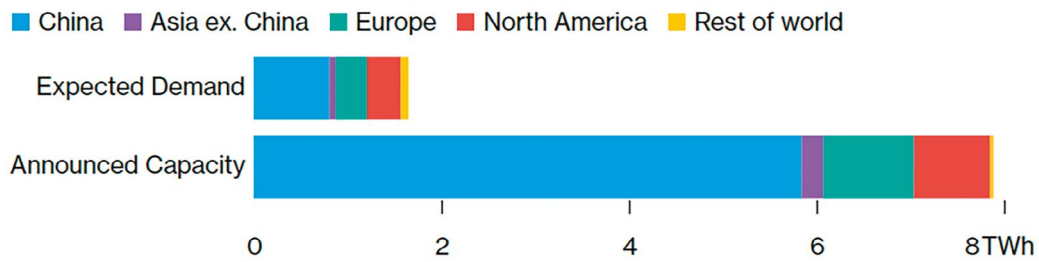
Bloomberg NEF (ang. New Energy Finance), zwane również BNEF, to uznana na świecie organizacja badawcza specjalizująca się w analizie i badaniach rynków energii odnawialnej, w tym magazynowania energii i technologii energetycznych. Wyróżnia się jako niezależne źródło informacji i analiz, które jest wykorzystywane przez firmy, inwestorów oraz organizacje rządowe

is increasing (see Figure 1), while battery prices are falling (see Figure 2). This will result in an increasing number of batteries entering the recycling process.

w całym sektorze energetycznym. Według jej danych zdolność produkcyjna baterii wzrasta (zob. ryc. 1.), a ceny baterii maleją (zob. ryc. 2). Będzie się to wiązać z coraz większą liczbą baterii w procesie recyklingu.

## Battery Manufacturing Capacity Is Oversupplied

Announced lithium-ion battery manufacturing capacity and demand in 2025.



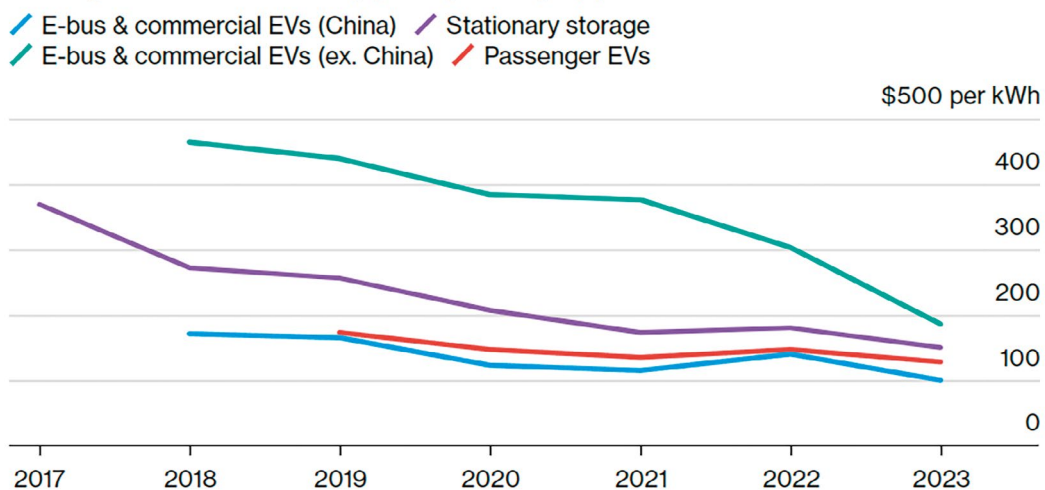
Source: BloombergNEF

Note: Capacity and demand figures are annual. Not all capacity will come online. Demand figure is BNEF's forecast.

**Figure 1.** Data on energy production capacity and demand on an annual basis  
**Rycina 1.** Dane dotyczące zdolności produkcyjnej i popytu energii w ujęciu rocznym  
 Source / Źródło: Bloomberg NEF.

## Battery Prices Are Converging

Average lithium-ion battery pack price by application



Source: BloombergNEF

Note: EV includes battery electric vehicles only. Figures in real 2023 dollars.

**Figure 2.** Average price of a lithium-ion battery by application  
**Rycina 2.** Średnia cena akumulatora litowo-jonowego według zastosowania  
 Source / Źródło: Bloomberg NEF.

The battery cell recycling market focuses on recovering metals such as lithium, cobalt, nickel, manganese, copper, and aluminium, which are essential for the production of new batteries. Recycling processes include mechanical technologies (shredding, sorting) [26], chemical technologies (leaching, extraction) [27], and thermal (pyrolysis, melting) [28]. The factors driving the growth of this market are the increasing popularity of electric vehicles (EVs) and mobile devices, regulations promoting the circular economy, and limited natural resources of metals essential for the battery industry. At the same time, the industry faces challenges such as high recycling costs (often exceeding the extraction of primary raw materials), the complexity of technological processes requiring specialized infrastructure, and safety and environmental issues related to the processing of hazardous waste. Recycling lithium-ion batteries has both positive and negative effects on the environment. The benefits include the recovery of metals (lithium, cobalt, nickel, manganese), which reduces the need for primary raw material extraction and limits environmental degradation. In addition, recycling minimizes the amount of hazardous waste that could contaminate soil and water, and saves energy compared to production from primary raw materials. It is an example of a circular economy based on the reuse of materials. On the other hand, some recycling methods are energy-intensive (especially thermal and chemical processes), which generates CO<sub>2</sub> emissions. There is also a risk of chemical contamination from by-products of recycling processes. The logistics and transport of used batteries to plants can contribute to greenhouse gas emissions, especially over long distances. In addition, not all materials can be fully recovered, and residues often end up in landfills, especially in countries with low environmental standards [29].

To limit the harmful impact of recycling on the environment, technological innovations (e.g., hydrometallurgy) should be implemented. It is also important to locate recycling plants close to sources of used batteries so that their transport is shorter. Legal regulations requiring responsible waste management and educating consumers and businesses on proper battery disposal are also essential. Legal provisions on lithium-ion battery recycling are becoming increasingly stringent, especially in the European Union. Their aim is to protect the environment and promote a circular economy [30–33]. The costs of recycling lithium-ion batteries are complex and depend on many factors, including recycling technology, scale of operations, battery chemical composition, infrastructure availability, and local regulations. Table 1 shows recycling costs in selected countries.

Rynek recyklingu ogniw bateryjnych koncentruje się na odzyskiwaniu metali, takich jak lit, kobalt, nikiel, mangan, miedź i aluminium, które są kluczowe dla produkcji nowych baterii. Procesy recyklingu obejmują technologie mechaniczne (rozdrabnianie, sortowanie) [26], chemiczne (ługowanie, ekstrakcja) [27] oraz termiczne (piroliza, topienie) [28]. Czynnikiem napędzającym rozwój tego rynku są rosnąca popularność pojazdów elektrycznych (EV) i urządzeń mobilnych, regulacje prawne promujące gospodarkę o obiegu zamkniętym oraz ograniczone zasoby naturalne metali niezbędnych dla przemysłu bateryjnego. Jednocześnie branża stoi przed wyzwaniami, takimi jak wysokie koszty recyklingu (często przewyższające wydobycie surowców pierwotnych), złożoność procesów technologicznych wymagających specjalistycznej infrastruktury oraz kwestie bezpieczeństwa i ekologii związane z przetwarzaniem niebezpiecznych odpadów. Recykling baterii litowo-jonowych ma zarówno pozytywne, jak i negatywne skutki dla środowiska. Do korzyści należy odzysk metali (lit, kobalt, nikiel, mangan), co redukuje potrzebę wydobycia surowców pierwotnych i ogranicza degradację środowiska. Ponadto recykling minimalizuje ilość odpadów niebezpiecznych, które mogłyby zanieczyścić glebę i wodę, oraz oszczędza energię w porównaniu z produkcją z surowców pierwotnych. Jest przykładem gospodarki o obiegu zamkniętym, opierającej się na ponownym wykorzystaniu materiałów. Z drugiej strony, niektóre metody recyklingu są energochłonne (zwłaszcza procesy termiczne i chemiczne), co generuje emisję CO<sub>2</sub>. Istnieje również ryzyko zanieczyszczenia chemicznego poprzez uboczne produkty procesów recyklingowych. Logistyka i transport zużytych baterii do zakładów mogą przyczynić się do emisji gazów cieplarnianych, szczególnie przy długich dystansach. Dodatkowo nie wszystkie materiały można w pełni odzyskać, a pozostałości często trafiają na składowiska, zwłaszcza w krajach o niskich standardach ekologicznych [29].

Aby ograniczyć szkodliwy wpływ recyklingu na środowisko, należy wdrażać innowacje technologiczne (np. hydrometalurgię). Ważne jest także lokalizowanie zakładów recyklingowych blisko źródeł zużytych baterii, tak by ich transport był krótszy. Niezbędne są również regulacje prawne nakazujące odpowiedzialne zarządzanie odpadami oraz edukacja konsumentów i firm w zakresie właściwej utylizacji baterii. Zapisy prawne dotyczące recyklingu baterii litowo-jonowych stają się coraz bardziej rygorystyczne, zwłaszcza w Unii Europejskiej. Ich celem jest ochrona środowiska i promowanie gospodarki o obiegu zamkniętym [30–33]. Koszty recyklingu baterii litowo-jonowych są złożone i zależą od wielu czynników, w tym od technologii recyklingu, skali operacji, składu chemicznego baterii, dostępności infrastruktury oraz lokalnych regulacji prawnych. W tabeli 1 przedstawione są koszty recyklingu w wybranych krajach.

**Table 1.** Overview of fees and subsidies for battery recycling in selected countries  
**Tabela 1.** Przegląd opłat i dotacji na recykling baterii w wybranych krajach

Country/Region / Kraj/Region	Type of incentive/Fees / Rodzaj zachęty/Oplaty	Addressee / Adresat	Details / Szczegóły
China (Shanghai) / Chiny (Szanghaj)	Grant / Dotacja	BEV manufacturers / Producenci BEV	1,000 yuan for each used battery recovered / 1000 juanów za każdą odzyskaną zużytą baterię
China (Hefei) / Chiny (Hefei)	Grant / Dotacja	Battery and BEV manufacturers / Producenci baterii i BEV	10 yuan per kWh based on battery capacity for recycling used batteries / 10 juanów za kWh na podstawie pojemności baterii za recykling zużytych baterii
China (Shenzhen) / Chiny (Shenzhen)	Deposit system / System depozytowy	Retailers / Sprzedawcy detaliczni	Deposit of 20 yuan per kWh, maximum refund of 10 yuan per kWh after recycling / Depozyt 20 juanów za kWh, maksymalny zwrot 10 juanów za kWh po recyklingu
European Union / Unia Europejska	Regulations / Przepisy	Battery manufacturers / Producenci baterii	Recycling targets (65% by 2025, 70% by 2030), battery management systems, potential deposit systems / Cele recyklingu (65% do 2025 r., 70% do 2030 r.), systemy zarządzania bateriami, potencjalne systemy depozytowe
United States / Stany Zjednoczone	Tax relief (inflation reduction act) / Ulga podatkowa (inflation reduction act)	EV battery manufacturers / Producenci baterii do EV	Tax relief for production using a specified percentage of domestic or recycled critical minerals / Ulga podatkowa za produkcję przy użyciu określonego procentu krajowych lub pochodzących z recyklingu krytycznych minerałów
India / Indie	Extended Manufacturer Responsibility (battery waste management rules) / Rozszerzona Odpowiedzialność Producenta (battery waste management rules)	Battery manufacturers / Producenci baterii	Obligation to establish collection and recycling systems / Obowiązek tworzenia systemów zbiórki i recyklingu

Source / Źródło: Bloomberg NEF.

High transportation and storage costs increase recycling fees. Below are examples of how individual companies are reducing transportation and processing costs. Spiers New Technology (SNT) performs both EV battery dismantling and recycling at the same facility. This model can significantly reduce transportation costs and the logistical complexity associated with moving batteries between different locations. Redwood Materials, one of North America's largest lithium-ion battery recycling facilities, is likely to benefit from economies of scale in its logistics operations and has established partnerships with OEMs for battery collection. Another company, Li-Cycle, uses its patented Spoke & Hub Technologies™ model, in which Spoke facilities pre-process batteries, which are then sent to central Hub facilities for further recycling. This model aims to optimize transportation by concentrating shipments of more refined material. Cirba Solutions helped Toyota expand its battery recycling network to a nationwide program, resulting in a reported 70 percent reduction in total transportation and logistics costs for used batteries and

Wysokie koszty transportu oraz magazynowania podwyższają opłaty za recykling. Poniżej przedstawiono przykłady tego, w jaki sposób poszczególne firmy obniżają koszty transportu i przetwarzania. Firma Spiers New Technology (SNT) prowadzi zarówno demontaż, jak i recykling baterii EV w tym samym obiekcie. Jest to model, który może znacząco obniżyć koszty transportu i złożoność logistyczną związaną z przemieszczaniem baterii między różnymi lokalizacjami. Z kolei firma Redwood Materials – jeden z największych zakładów recyklingu baterii litowo-jonowych w Ameryce Północnej – prawdopodobnie korzysta z korzyści skali w swoich operacjach logistycznych i nawiązała partnerstwa z producentami OEM w zakresie zbiórki baterii. Kolejna firma, Li-Cycle, wykorzystuje opatentowany przez siebie model Spoke & Hub Technologies™, w którym zakłady Spoke wstępnie przetwarzają baterie, które następnie są wysyłane do centralnych zakładów Hub w celu dalszego recyklingu. Model ten ma na celu optymalizację transportu poprzez skoncentrowanie wysyłki bardziej rafinowanego materiału. Firma Cirba Solutions pomogła

a reduction in transportation-related emissions. The battery recycling process also consumes significantly less water and energy compared to the extraction and refining of new metals. It is estimated that water consumption can be reduced by 72 to 88%, and energy consumption by 77 to 89%. Recycling thus contributes to the conservation of valuable natural resources and reduces the overall energy demand in the manufacturing sector (see Table 2).

Toyocie w rozszerzeniu jej sieci recyklingu baterii do programu ogólnokrajowego, co zaowocowało zgłoszonym 70-procentowym obniżeniem całkowitych kosztów transportu i logistyki zużytych baterii oraz zmniejszeniem emisji związanych z transportem. Proces recyklingu baterii zużywa również znacznie mniej wody i energii w porównaniu z wydobyciem i rafinacją nowych metali. Szacuje się, że zużycie wody może być mniejsze od 72 do 88%, a zużycie energii od 77 do 89%. Recykling przyczynia się w ten sposób do ochrony cennych zasobów naturalnych i zmniejsza ogólne zapotrzebowanie na energię w sektorze produkcyjnym (zob. tab. 2).

**Table 2. Overview of fees and subsidies for battery recycling in selected countries**  
**Tabela 2. Przegląd opłat i dotacji na recykling baterii w wybranych krajach**

Indicator / Wskaźnik	Primary extraction / Wydobycie pierwotne	Battery recycling / Recykling baterii	Source / Źródło
Greenhouse gas emissions / Emisja gazów cieplarnianych	High / Wysokie	Lower by 58–81% / Niższa o 58–81%	Stanford University research / Badania Stanford University
Water consumption / Zużycie wody	High / Wysokie	Lower by 72–88% / Niższe o 72–88%	Stanford University research / Badania Stanford University
Energy consumption / Zużycie energii	High / Wysokie	Lower by 77–89% / Niższe o 77–89%	Stanford University research / Badania Stanford University

Source / Źródło: Bloomberg NEF.

The growth of the battery recycling market is driven by four key factors: technological innovation, the number of used batteries, government support, and battery standardization. Technological innovation enables the development of increasingly efficient and cost-effective methods of recovering raw materials, such as modern hydrometallurgical processes. At the same time, economies of scale resulting from the increase in the number of used batteries and the emergence of larger recycling plants are gradually reducing unit processing costs. Government support in the form of subsidies, tax breaks, and research programs that stimulate the development of the industry also plays an important role. An additional impulse could be the standardization of batteries, which, by unifying their design, would significantly simplify and reduce the costs of recycling processes. The combination of these factors creates favourable conditions for the further dynamic development of the battery recycling sector.

Rozwój rynku recyklingu baterii napędzają cztery kluczowe czynniki, do których należą: innowacje technologiczne, liczba zużytych baterii, wsparcie rządu oraz standaryzacja baterii. Innowacje technologiczne umożliwiają tworzenie coraz bardziej efektywnych i tańszych metod odzysku surowców, takich jak nowoczesne procesy hydrometalurgiczne. Jednocześnie ekonomia skali, wynikająca ze wzrostu liczby zużytych baterii i powstawania większych zakładów recyklingowych, stopniowo obniża koszty jednostkowe przetwarzania. Istotną rolę odgrywa także wsparcie rządowe w postaci dotacji, ulg podatkowych i programów badawczych, które stymulują rozwój branży. Dodatkowym impulsem mogłaby być standaryzacja baterii, która poprzez ujednoczenie ich konstrukcji znacząco uprościłaby i obniżyła koszty procesów recyklingowych. Połączenie tych czynników tworzy sprzyjające warunki dla dalszego dynamicznego rozwoju sektora recyklingu baterii.

## The concept of using selected recycled 18650 cylindrical and prismatic LiFePO<sub>4</sub> cells for the construction of energy storage facilities

### Characteristics of LG MJ1 cells

The LG MJ1 18650 lithium-ion cell is widely recognized as a high-performance, high-capacity power source [34]. Its popularity is reflected in its wide range of applications, from electric bicycles and power banks to power tools and portable devices. The availability of information about this cell in various sources, such as manufacturers' websites, specialist reviews, and battery design portals, testifies to the importance of this model in the battery technology industry. Below is a comprehensive description of the LG MJ1 cell, based on available technical data and

## Koncepcja wykorzystania wybranych ogniw cylindrycznych 18650 oraz pryzmatycznych LiFePO<sub>4</sub> z odzysku do budowy magazynów energii

### Charakterystyka ogniw LG MJ1

Ogniwo litowo-jonowe LG MJ1 18650 jest powszechnie uznawane za wysokowydajne źródło zasilania o dużej pojemności [36]. Jego popularność znajduje odzwierciedlenie w szerokim zakresie zastosowań, od rowerów elektrycznych i powerbanków po elektronarzędzia i urządzenia przenośne. Dostępność informacji na temat tego ogniwa w różnych źródłach, takich jak strony producentów, recenzje specjalistyczne i portale poświęcone projektowaniu baterii, świadczy o znaczeniu tego modelu w branży technologii akumulatorowych. Poniżej przedstawiono kompleksową charakterystykę

research. This analysis covers key electrical parameters, physical properties, operating and storage conditions, safety aspects, and cyclic characteristics, providing detailed information for engineers, researchers, and other professionals interested in this cell.

The cathode of the LG MJ1 cell is made of nickel-rich lithium-nickel-manganese-cobalt oxide (NMC811), while the anode is graphite-based with added silicon (approximately 3.5% by weight). The high-nickel NMC811 cathode typically provides higher energy density. The presence of silicon in the anode contributes to increased cell capacity. The average wall thickness of the cell casing is 0.165 mm, with a maximum of 0.19 mm. The casing ensures structural integrity and increases cell safety. The LG MJ1 cell is characterized by high energy density, both in terms of weight and volume. High energy density is a key advantage of this cell, especially in mobile applications and where weight and size are critical. Slight differences in the values provided may result from different testing methodologies or manufacturing variances. The standard discharge current for an LG MJ1 cell is 0.2 C, which corresponds to 680 mA. Some sources cite a value of 670 mA. This current is typically used to determine the nominal capacity of the cell and represents a moderate load. The LG MJ1 cell can be discharged at a maximum current of 10 A. This high discharge capacity makes the cell suitable for applications requiring significant power output, such as power tools or electric bicycles. When charging LG MJ1 cells, a constant voltage of 4.2 V must be maintained, with a tolerance of  $\pm 0.05$  V. Precise voltage control during charging is extremely important to prevent overcharging, which can lead to dangerous situations and shorten the life of the cell [35].

Table 3 presents a summary of the most important technical parameters of the LG MJ1 cell, which relate to its key properties. The wide operating temperature range (from  $-20$  to  $60^{\circ}\text{C}$ ) allows the LG MJ1 cell to be used in various environmental conditions. However, extreme temperatures can negatively affect battery performance and life.

**Table 3.** LG MJ1 18650 cell parameters  
**Tabela 3.** Parametry ogniwa LG MJ1 18650

Parameter / Parametr	Value / Wartość
Nominal capacity / Pojemność nominalna	3500 mAh
Minimum capacity / Pojemność minimalna	3350–3400 mAh
Nominal voltage / Napięcie nominalne	3.635 V
Maximum charging voltage / Maksymalne napięcie ładowania	$4.2 \pm 0.05$ V
Maximum discharge current / Maksymalny prąd rozładowania	10 A
Dimensions (diameter x height) / Wymiary (średnica x wysokość)	$18.4 \times 65.0 \pm 0.2$ mm
Maximum weight / Waga maks.	49.0 g
Operating temperature (charging) / Temperatura pracy (ładowanie)	$0 \sim 45^{\circ}\text{C}$
Operating temperature (discharging) / Temperatura pracy (rozładowanie)	$-20 \sim 60^{\circ}\text{C}$

Source / Źródło: [www.lygte-info.dk](http://www.lygte-info.dk).

ogniwa LG MJ1, opierając się na dostępnych danych technicznych i badaniach. Analiza ta obejmuje kluczowe parametry elektryczne, fizyczne właściwości, warunki pracy i przechowywania, aspekty bezpieczeństwa oraz charakterystykę cykliczną, dostarczając szczegółowych informacji dla inżynierów, badaczy i innych specjalistów zainteresowanych tym ogniwem.

Katoda ogniwa LG MJ1 wykonana jest z bogatego w nikiel litowo-niklowo-manganowo-kobaltowego tlenku (NMC811), natomiast anoda jest na bazie grafitu z dodatkiem krzemu (około 3,5% wagowych). Katoda NMC811 o wysokiej zawartości niklu zazwyczaj zapewnia wyższą gęstość energii. Obecność krzemu w anodzie przyczynia się do zwiększenia pojemności ogniwa. Średnia grubość ścianki obudowy ogniwa wynosi 0,165 mm, maksymalnie 0,19 mm. Obudowa zapewnia integralność strukturalną i zwiększa bezpieczeństwo ogniwa. Ogniwo LG MJ1 charakteryzuje się wysoką gęstością energii, zarówno pod względem masy, jak i objętości. Wysoka gęstość energii jest kluczową zaletą tego ogniwa, szczególnie w aplikacjach mobilnych i tam, gdzie waga oraz rozmiar mają krytyczne znaczenie. Niewielkie różnice w podawanych wartościach mogą wynikać z różnych metodologii testowania lub wariacji produkcyjnych. Standardowy prąd rozładowania dla ogniwa LG MJ1 wynosi 0,2 C, co odpowiada 680 mA. W niektórych źródłach podawana jest wartość 670 mA. Ten prąd jest zazwyczaj używany do określania nominalnej pojemności ogniwa i reprezentuje umiarkowane obciążenie. Ogniwo LG MJ1 może być rozładowywane maksymalnym prądem 10 A. Ta wysoka zdolność do rozładowania sprawia, że ogniwo to nadaje się do zastosowań wymagających znacznej mocy wyjściowej, takich jak elektronarzędzia czy rowery elektryczne. Podczas ładowania ogniwa LG MJ1 należy utrzymywać stałe napięcie na poziomie 4,2 V, z tolerancją  $\pm 0,05$  V. Precyzyjna kontrola napięcia podczas ładowania jest niezwykle ważna, aby zapobiec przeładowaniu, które może prowadzić do niebezpiecznych sytuacji oraz skrócenia żywotności ogniwa [35].

Tabela 3 przedstawia zestawienie najważniejszych parametrów technicznych ogniwa LG MJ1, które odnoszą się do jego kluczowych właściwości. Szeroki zakres temperatur pracy (od  $-20$  do  $60^{\circ}\text{C}$ ) umożliwia stosowanie ogniwa LG MJ1 w różnych warunkach środowiskowych. Ekstremalne temperatury mogą jednak negatywnie wpływać na wydajność i żywotność baterii.

The cells require precautions in the form of Battery Management System (PCB/BMS) safety circuits that monitor and control the operation of batteries, usually lithium-ion batteries. The LG MJ1 cell is an unprotected cell intended for use only in battery packs equipped with a battery management system (BMS) or protection circuit board (PCB). Using this cell without proper protection can lead to dangerous situations such as overcharging, excessive discharge, and short circuits [36].

Extreme caution should be exercised when using lithium-ion cells, as improper handling may cause fire or explosion, resulting in personal injury, property damage, or death. It is prohibited to intentionally or accidentally short-circuit the cell poles, use damaged cells, overcharge above the maximum voltage, excessively discharge, modify, disassemble, puncture, cut, crush, or throw into fire. Exposing the cell to liquids or high temperatures, solder directly to the cell (only spot welding is permitted), or compress it in any direction during installation or reverse polarity should not be done. The cells should be stored away from metal objects, animals, and children, and charged on a non-flammable surface under supervision. Only smart chargers designed for this type of cell should be used. Batteries should never be carried loose in a pocket, purse, or bag [37].

The LG MJ1 cell has undergone a series of safety tests, including crush and impact tests. These tests did not cause an explosion or fire (in accordance with UL1642). The vibration test did not reveal any leaks. The cell also successfully passed external short circuit and overcharge tests (in accordance with UL1642). These results indicate a certain level of inherent safety of the cell under specific conditions of excessive operation, but do not eliminate the need for external safety systems. During the thermal instability test, energy release of 73.8 kJ was recorded, 80% of which occurred through the ejection of material and gases. This shows how much energy a damaged lithium-ion cell can release and the potential dangers involved. The LG MJ1 cell achieves 400 charge and discharge cycles under the following conditions: charging with 1.5 A current, discharging with 4 A current to 80% depth of discharge (DoD). The service life in terms of equivalent cycles is strongly dependent on operating conditions. An equivalent cycle can be assumed to be between 0 and 100%, which is equal to, for example, 5 cycles from 20 to 40% and 5 cycles from 70 to 90%. More demanding conditions, such as higher charging and discharging currents or a wider state of charge (SOC) range, can shorten the life of the cell. State of charge is an indicator expressed as a percentage that determines how much energy is left in the battery.

High discharge current (3C) can lead to cell life ending in less than 600 equivalent cycles. Cyclic use over a wide SOC range (10 to 90%) shortens life compared to a narrower range (70 to 90%). The SOC level during storage also affects degradation. Storage at low SOC (10%) causes the least degradation compared to 70% and 90% SOC, with storage at 70% SOC showing greater degradation than at 90% SOC. These observations provide valuable insights for optimizing battery use and storage to maximize battery life in specific applications. The DCIR (Direct Current Internal Resistance) of the LG MJ1 cell is 33 mΩ, and in another measurement 60 mΩ. The ACIR (Alternate Current Internal Resistance)

Ogniwa wymagają środków ostrożności w postaci układów zabezpieczających Battery Management System (PCB/BMS), monitorujących i kontrolujących pracę akumulatorów, zazwyczaj litowo-jonowych. Ogniwo LG MJ1 jest ogniwem niechronionym, przeznaczonym do stosowania wyłącznie w pakietach bateryjnych wyposażonych w system zarządzania baterią (BMS) lub płytke zabezpieczającą (PCB). Używanie tego ogniwa bez odpowiedniego zabezpieczenia może prowadzić do niebezpiecznych sytuacji, takich jak przeładowanie, nadmierne rozładowanie i zwarcie [36].

Należy zachować szczególną ostrożność podczas użytkowania ogniw litowo-jonowych, ponieważ niewłaściwe obchodzenie się z nimi może spowodować pożar lub wybuch, prowadząc do obrażeń ciała, uszkodzenia mienia lub śmierci. Zabrania się celowego lub przypadkowego zwierania biegunów ogniwa, używania uszkodzonych ogniw, przeładowywania powyżej maksymalnego napięcia, nadmiernego rozładowywania, modyfikowania, rozbiierania, przebijania, cięcia, zgniatania lub wrzucania do ognia. Nie należy wystawiać ogniwa na działanie cieczy lub wysokich temperatur, lutować bezpośrednio do ogniwa (dozwolone jest tylko zgrzewanie punktowe) oraz ścisnąć w którymkolwiek kierunku w czasie montażu lub w odwrotnej polaryzacji. Ogniwa należy przechowywać z dala od metalowych przedmiotów, zwierząt i dzieci oraz ładować na niepalnej powierzchni pod nadzorem. Należy używać wyłącznie inteligentnych ładowarek przeznaczonych do tego typu ogniw. Nigdy nie należy nosić luzem baterii w kieszeni, torebce lub torbie [37].

Ogniwo LG MJ1 przeszło szereg testów bezpieczeństwa, w tym próbę zgniecenia i uderzenia. Nie spowodowały one wybuchu ani pożaru (zgodnie z normą UL1642). Test wibracji nie wykazał wycieków. Ogniwo pomyślnie przeszło też testy na zwarcie zewnętrzne oraz test przeładowania (zgodnie z normą UL1642). Wyniki te wskazują na pewien poziom inherentnego bezpieczeństwa ogniwa w określonych warunkach nadmiernej eksploatacji, jednak nie zwalniają z konieczności stosowania zewnętrznych układów zabezpieczających. Podczas testu niestabilności termicznej odnotowano uwolnienie energii na poziomie 73,8 kJ, z czego 80% energii nastąpiło poprzez wyrzut materiału i gazów. To pokazuje, jak znaczną energię może uwolnić uszkodzone ogniwo litowo-jonowe i jakie potencjalne zagrożenia się z tym wiążą. Ogniwo LG MJ1 osiąga 400 cykli ładowania i rozładowania przy następujących warunkach: ładowanie prądem 1,5 A, rozładowanie prądem 4 A do 80% głębokiego rozładowania (ang. *Depth of discharge*, DoD). Żywotność w skali równoważnych cykli jest silnie zależna od warunków pracy. Za równoważny cykl możemy przyjąć od 0 do 100%, który jest równy np. 5 cyklom od 20 do 40% i np. 5 cyklom od 70 do 90%. Bardziej wymagające warunki, takie jak wyższy prąd ładowania i rozładowania czy szerszy zakres stanu naładowania (ang. *State of Charge*, SOC), mogą skrócić żywotność ogniwa. Stan naładowania to wskaźnik wyrażany w procentach, który określa ile energii jeszcze zostało w akumulatorze.

Wysoki prąd rozładowania (3C) może doprowadzić do zakończenia żywotności ogniwa w mniej niż 600 równoważnych cyklach. Cykliczne użytkowanie w szerokim zakresie SOC (od 10 do 90%) skraca żywotność w porównaniu z węższym zakresem (od 70 do 90%). Poziom SOC podczas przechowywania również ma wpływ na degradację. Przechowywanie przy niskim SOC (10%) powoduje

at a frequency of 1 kHz is less than or equal to 40 mΩ. Internal resistance affects the voltage drop under load and the overall efficiency of the battery. Lower resistance usually means better performance. Differences in DCIR values, i.e. direct current internal resistance, can result from many factors – both internal and external – related to the cell itself and the measurement conditions. These include, among others, the state of charge of the battery. The internal resistance of a battery is not constant and varies depending on its charge level. It is usually lowest in the middle range of SoC (e.g., 40–60%) and increases at extreme values – both at full charge and deep discharge. This is due to chemical changes in the structure of the electrodes and in the conductivity of the electrolyte. Temperature is one of the most important factors. At low temperatures, chemical reactions inside the cell slow down and the viscosity of the electrolyte increases, leading to a significant increase in internal resistance. Conversely, at higher temperatures, DCIR decreases. Therefore, comparative measurements should always be performed at the same controlled temperature. The DCIR value is also affected by the age and wear of the battery (State of Health, SoH). As the battery ages and wears out, its internal resistance increases steadily. This is a natural degradation process resulting, among other things, from the build-up of a passive layer (Solid Electrolyte Interphase, SEI) on the electrodes, loss of active material, or drying out of the electrolyte. The increase in DCIR is a key indicator of battery power. Different types of batteries (e.g., lithium-ion, LiFePO<sub>4</sub>, lead-acid) also have different internal resistance values. Even within the same technology (e.g., Li-Ion), different chemical compositions (NMC, LFP, LCO) will have different DCIR values. Battery internal resistance is a nonlinear phenomenon. Therefore, test standards (e.g. IEC) often specify the current used for measurements precisely. DCIR measurement involves applying a current pulse and measuring the voltage drop. Differences in the duration of this pulse (e.g. 10 ms, 100 ms, 1 s) can give different results because they take into account different electrochemical processes occurring in the cell on different time scales. The measurement result will be different if the battery has been recently charged or discharged, compared to a battery that has not been used for several hours [40]. After intensive use, the chemical and physical properties of the cell need time to stabilize. The accuracy of the meter, the quality of the connections (e.g. contact resistance), and the method of connection to the battery terminals have a direct impact on the result. A poor connection can artificially inflate the measured resistance value. Internal resistance is a factor that affects the energy efficiency of a battery. It determines the voltage drop across the battery when a load is applied. As we know, power and performance are values that are strictly dependent on voltage. Accordingly, when the voltage drop is significant, the power and performance are reduced. When the internal resistance of the battery increases, the voltage drops can be so significant that it will not be possible to maintain the operating voltage of the powered device. At this point, we are not utilizing the full energy potential of the battery.

najmniejszą degradację w porównaniu z 70% i 90% SOC, przy czym przechowywanie przy 70% SOC wykazało większą degradację niż przy 90% SOC. Te obserwacje dostarczają cennych wskazówek dotyczących optymalizacji użytkowania i przechowywania baterii w celu maksymalizacji jej żywotności w konkretnych zastosowaniach. Rezystancja wewnętrzna DCIR (ang. *Direct Current Internal Resistance*) ogniwa LG MJ1 wynosi 33 mΩ, a w innym pomiarze 60 mΩ. Rezystancja ACIR (ang. *Alternate Current Internal Resistance*) przy częstotliwości 1 kHz jest mniejsza lub równa 40 mΩ. Rezystancja wewnętrzna wpływa na spadek napięcia pod obciążeniem oraz na ogólną efektywność baterii. Niższa rezystancja zazwyczaj oznacza lepszą wydajność. Różnice w wartościach DCIR, czyli rezystancji wewnętrznej prądu stałego, mogą wynikać z wielu czynników – zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych, związanych z samym ogniwem oraz warunkami pomiaru. Należy do nich m.in. stan naładowania baterii. Rezystancja wewnętrzna baterii nie jest stała i zmienia się w zależności od poziomu jej naładowania. Zazwyczaj jest najniższa w środkowym zakresie SoC (np. 40–60%) i wzrasta przy skrajnych wartościach – zarówno przy pełnym naładowaniu, jak i głębokim rozładowaniu. Dzieje się tak z powodu zmian chemicznych w strukturze elektrod oraz w przewodności elektrolitu. Temperatura to jeden z najważniejszych czynników. W niskich temperaturach reakcje chemiczne wewnątrz ogniwa zwalniają, a lepkość elektrolitu wzrasta, co prowadzi do znacznego zwiększenia rezystancji wewnętrznej. Odwrotnie, w wyższych temperaturach DCIR maleje. Dlatego pomiary porównawcze powinny być zawsze wykonywane w tej samej, kontrolowanej temperaturze. Wpływ na wartość DCIR mają także wiek i zużycie baterii (ang. *State of Health*, SoH). W miarę starzenia się i zużywania baterii jej rezystancja wewnętrzna systematycznie rośnie. Jest to naturalny proces degradacji, wynikający m.in. z narastania warstwy pasywnej (ang. *Solid Electrolyte Interphase*, SEI) na elektrodach, utraty materiału aktywnego czy wysychania elektrolitu. Wzrost DCIR jest kluczowym wskaźnikiem informującym o mocy baterii. Również różne typy baterii (np. litowo-jonowe, LiFePO<sub>4</sub>, kwasowo-ołowiowe) charakteryzują się odmiennymi wartościami rezystancji wewnętrznej. Nawet w obrębie tej samej technologii (np. Li-Ion) różne składy chemiczne (NMC, LFP, LCO) będą miały inne wartości DCIR. Rezystancja wewnętrzna baterii jest zjawiskiem nieliniowym. Dlatego standardy testowe (np. IEC) często precyzyjnie określają prąd używany do pomiarów. Pomiar DCIR polega na przyłożeniu impulsu prądowego i zmierzeniu spadku napięcia. Różnice w czasie trwania tego impulsu (np. 10 ms, 100 ms, 1 s) mogą dawać różne wyniki, ponieważ uwzględniają różne procesy elektrochemiczne zachodzące w ogniwie w różnej skali czasowej. Wynik pomiaru będzie inny, jeśli bateria była niedawno ładowana lub rozładowywana, w porównaniu do baterii, która nie była używana przez kilka godzin [38]. Po intensywnej pracy chemiczne i fizyczne właściwości ogniwa potrzebują czasu na stabilizację. Dokładność miernika, jakość połączeń (np. rezystancja styków) i sposób podłączenia do terminali baterii mają bezpośredni wpływ na wynik. Słabe połączenie może sztucznie zawyżyć zmierzoną wartość rezystancji. Rezystancja wewnętrzna to czynnik wpływający na wydajność energetyczną akumulatora. Decyduje on o spadku napięcia na akumulatorze po przyłożeniu obciążenia. Jak wiadomo, moc i praca są to wartości ściśle zależne od napięcia. Zatem gdy spadek

## Concept of a storage facility based on recycled 18650 LGMJ1 10A cells

The first concept involves the construction of a storage facility in a 13 S (13 cells connected in series) and 30 P (cells connected in parallel) configuration, with the following parameters: 13 S x 4.2 V = 54.6 V (maximum battery charge voltage), 48 V (nominal voltage), 30 P x 3.45 Ah = 103.5 Ah (energy storage capacity). Operating voltage range set on Smart BMS from 35.1 V (2.7 V cut-off threshold by BMS) to 54.6 V (4.2 V cut-off threshold by BMS). The charging current recommended by the manufacturer, safe for a new cell according to the data sheet, is 1.7 A (0.5 C) x 30 P = 51 A. The discharge current recommended by the manufacturer as safe for a new cell according to the data sheet is 3.4 A (1 C) x 30 = 102 A. The weight of these cells in storage is 18.3 kg. Before construction begins, the cells should be checked and have equal potentials. When building a battery, it is not recommended to glue the cells together with adhesive, but rather to assemble them in specially designed Li-Ion baskets (honeycomb). This allows them to remain stable during the welding process and subsequent operation, and also reduces the risk of mechanical damage to the cells, which can then lead to short circuits and fire. The use of baskets allows batteries of any shape to be constructed: rectangular, square, or triangular. During the construction process, it is important to use special insulators on the positive side of the cell to prevent short circuits and ignition during the welding process. Nickel tape, which has better conductivity than steel tape, is needed to weld the packs. In this case, tape with a cross-section of 7 x 0.2 is recommended. Copper sheets specially designed and cut to size for each cell can also be used. The package should be welded using a spot welding machine, which allows you to set the pulse time and welding current. This ensures that the nickel tape is properly welded and does not burn through at any points. The cells should be degreased before welding. This is necessary because recycled cells may have marks left after the pins have been removed from the welds. After the welding process is complete, it is recommended to use Plastik Kontakt spray – a varnish that protects against moisture, corrosion, and oxidation. It is important to choose the right type of wires. A multi-strand cable with silicone insulation is a good choice. It is made of tinned copper. The maximum operating voltage for this cable is 600 V, and the operating temperature range is from -60°C to 200°C. The energy bank considered in this paper is designed for a cross-section of 10 AWG to ensure a reserve during continuous operation in charge/discharge mode.

napięcia jest duży, wówczas moc i praca są mniejsze. Gdy rezystancja wewnętrzna akumulatora wzrasta, wtedy spadki napięcia mogą być tak duże, że nie będzie można utrzymać napięcia operacyjnego zasilanego urządzenia. W tym momencie nie wykorzystujemy całkowitego potencjału energetycznego akumulatora.

## Koncepcja magazynu opartego na ogniwach 18650 LGMJ1 10A z odzysku

Pierwsza koncepcja zakłada budowę magazynu w konfiguracji 13 S (13 ogniw połączonych szeregowo), 30 P (ogniw połączonych równolegle), o parametrach: 13 S x 4,2 V = 54,6 V (napięcie maksymalnego naładowania akumulatora), 48 V (napięcie nominalne), 30 P x 3,45 Ah = 103,5 Ah (pojemność magazynu energii). Praca w zakresie napięciowym ustawionym na Smart BMS od 35,1 V (2,7 V próg odcięcia przez BMS) do 54,6 V (4,2 V próg odcięcia przez BMS). Prąd ładowania zalecany przez producenta, bezpieczny dla ogniwa nowego z karty katalogowej, to 1,7 A (0,5 C) x 30 P = 51 A. Prąd rozładowania zalecany przez producenta jako bezpieczny dla ogniwa nowego z karty katalogowej to 3,4 A (1 C) x 30 = 102 A. Waga tych ogniw w magazynie wynosi 18,3 kg. Ogniwa przed rozpoczęciem budowy powinny być sprawdzone i mieć równe potencjały. Do budowy magazynu nie zaleca się klejenia ogniw ze sobą za pomocą kleju, tylko montaż w specjalnie do tego zaprojektowanych koszykach Li-Ion (plaster miodu). Pozwala to zachować ich stabilność w procesie zgrzewania oraz późniejszej pracy, a także zmniejsza ryzyko uszkodzeń mechanicznych ogniwa, które mogą następnie prowadzić do zwarcia i pożaru. Używanie koszyków umożliwia budowanie baterii o dowolnym kształcie: prostokąta, kwadratu czy trójkąta. W procesie budowy ważne jest stosowanie specjalnych izolatorów na dodatnią stronę ogniwa, tak aby podczas procesu zgrzewania nie doszło do zwarcia i zapłonu. Do zgrzania pakietów potrzebna jest taśma niklowa, która wykazuje lepsze przewodzenie niż taśma stalowa. W tym przypadku zalecana jest taśma o przekroju 7 x 0,2. Można też użyć blach miedzianych specjalnie zaprojektowanych i wyciętych pod wymiar każdej z celi. Zgrzanie pakietu powinno odbywać się na zgrzewarce impulsowej punktowej, pozwalającej na ustawienie pracy poprzez nastawy czasu impulsów oraz prądu zgrzewania. Daje to pewność, że taśma niklowa zostanie odpowiednio zgrzana oraz nie dojdzie do jej punktowego przepalenia. Ogniwa przed procesem zgrzewania powinny być odtłuszczone. Jest to konieczne, ponieważ ogniwa z recyklingu mogą posiadać ślady po usuwaniu pinów po zgrzewach. Po zakończonym procesie zgrzewania zalecane jest użycie sprayu Plastik Kontakt – lakieru zabezpieczającego przed wilgocią, korozją czy utlenieniem. Ważnym aspektem jest dobranie odpowiednich rodzajów przewodów. Dobrym wyborem jest przewód wielożyłowy z silikonową izolacją. Wykonany jest z miedzi ocynowanej. Maksymalne napięcie pracy dla tego przewodu wynosi 600 V, a zakres temperatury pracy od -60°C do 200°C. W rozpatrywanym w niniejszej pracy banku energii przewidziany jest przekrój 10 AWG, tak aby zapewnić zapas podczas ciągłej pracy w trybie ładowanie/rozładowanie.

**Table 4.** AWG wire specifications  
**Tabela 4.** Parametry przewodów AWG

AWG identification / Oznaczenie AWG	Number of cores / core diameter [pcs/mm] / Liczba żył / średnica żyły [szt/mm]	Conductor diameter [mm] / Średnica przewodu [mm]	Total diameter [mm] / Całkowita średnica [mm]	Resistance [Ω/km] / Rezystancja [Ω/km]	Cross-sectional area [mm <sup>2</sup> ] / Powierzchnia przekroju [mm <sup>2</sup> ]	Maximum current [A] / Maksymalny prąd [A]
8 AWG	1650 / 0.08	4.4	6.7	4.1	8.37	190
10 AWG	1050 / 0.08	2.92	5.5	6.3	5.3	140
12 AWG	680 / 0.08	2.41	4.5	9.8	3.4	88.4
14 AWG	400 / 0.08	1.85	3.5	15.6	2.07	55.6
16 AWG	252 / 0.08	1.47	3	24.4	1.27	35
18 AWG	165 / 0.08	1.13	2.8	39.5	0.75	22
20 AWG	100 / 0.08	0.92	1.8	62.5	0.5	13.87
22 AWG	60 / 0.08	0.72	1.7	88.6	0.33	8.73

Source / Źródło: <https://avifly.pl/> [49].

An important safety aspect when constructing a storage facility is to insulate the completed battery with 2 mm thick epoxy glass/fiberglass on each side. This is necessary due to the weight of the storage facility and to protect it from mechanical damage. The connector used for the energy bank is a connector (terminal) for a DC 200 A energy storage facility, M8 + M8 set. One of the most important aspects of good management of energy storage from recycled cells is the selection of the right type of BMS and setting safe operating parameters. The use of a high-quality BMS guarantees correct operation and monitoring of the storage facility. It is not recommended to save money on BMS. For comparison, a standard BMS (without active balancing, parameter settings, CAN, RS 485, BT, Wi-Fi communication, real-time parameter monitoring without the need for a display) for 13 S, 150 A, including a reserve to prevent overheating, costs PLN 150–210. On the other hand, extended versions of BMS, such as Smart BMS [39] from Daly Bms [40], AntBms [41] or JK Bms [42], cost PLN 360–500. Considering the cost of building the entire warehouse, it is not worth saving money. After the connection process, but before plugging the sockets with balancing cables into the BMS, make sure that the cables are properly connected to the cell. This can be checked by reading the voltage meter on each cell.

Do ważnych aspektów bezpieczeństwa przy budowaniu magazynu należy izolacja wykonanej już baterii szkłem epoksydowym/włóknem szklanym o grubości 2 mm z każdej ze stron. Ma ona zastosowanie ze względu na ciężar magazynu i zabezpieczenie go przed uszkodzeniami mechanicznymi. Złącze zastosowane do banku energii to konektor (terminal) do magazynu energii DC 200 A, zestaw M8 + M8. Jednym z najważniejszych aspektów dobrego zarządzania magazynem energii z ogniw z odzysku jest dobór odpowiedniego rodzaju BMS oraz ustawienie bezpiecznych parametrów pracy. Zastosowanie dobrej klasy BMS gwarantuje poprawną pracę oraz monitorowanie magazynu. Nie zaleca się oszczędzania na BMS. Dla porównania zwykły BMS (bez aktywnego balansowania, ustawienia parametrów, komunikacji CAN, RS 485, BT, Wi-Fi, monitorowania na bieżąco parametrów bez potrzeby używania wyświetlacza) na 13 S, 150 A, uwzględniając zapas, by zapobiec przegrzewaniu, to koszt 150–210 zł. Z kolei rozszerzone wersje BMS, takie jak Smart BMS [39] firmy Daly Bms [40], AntBms [41] lub JK Bms [42], to koszt 360–500 zł. Biorąc pod uwagę koszt budowy całego magazynu, nie warto oszczędzać. Po procesie podłączenia, ale przed wpięciem gniazd z przewodami balansującymi do BMS należy się upewnić, że kable zostały prawidłowo podłączone do celi. Sprawdzić to można poprzez odczyt z miernika napięcia na poszczególnej celi.

**Table 5.** Comparison of the costs of purchasing Li-Ion cells – new and recycled  
**Tabela 5.** Porównanie kosztów zakupu ogniw Li-Ion – nowych oraz z odzysku

Cell type / Typ ogniw	Example cost of a recycled cell [PLN gross] / Przykładowy koszt ogniw z odzysku [zł brutto]	Example cost of a new cell [PLN gross] / Przykładowy koszt ogniw nowego [zł brutto]	Number of cells per warehouse [pcs.] / Liczba ogniw na magazyn [szt.]	Cost of purchasing recycled cells per warehouse [PLN gross] / Koszt zakupu ogniw z odzysku na magazyn [zł brutto]	Cost of purchasing new cells per warehouse [PLN gross] / Koszt zakupu nowych ogniw na magazyn [zł brutto]
18650 LgMj1	5.90	14.90	390	2301	5811
18650 LgMj1	6.80	17.00	390	2652	6630
18650 LgMj1	7.20	22.92	390	2808	8938.80
18650 LgMj1	7.80	26.91	390	3042	10494.90
18650 LgMj1	8.15	31.46	390	3178.50	12269.40

Source: Own elaboration.  
 Źródło: Opracowanie własne.

### Concept for the implementation of an energy storage system based on recycled LiFePO<sub>4</sub> EVE 50 Ah prismatic cells

The second battery under consideration contains a lithium iron phosphate (LiFePO<sub>4</sub>) cell with a nominal capacity of 50 Ah and a nominal voltage of 3.2 V. It has an operating range of 2.5 V to 3.65 V, with a maximum charging voltage of 3.65 V and a minimum discharging voltage of 2.5 V. Electrical parameters include: standard charging current of 25 A (0.5 C) with the possibility of increasing it to 50 A (1 C), standard discharge current of 50 A (1 C) with a maximum value of 150 A (3 C), and internal resistance not exceeding 0.2 mΩ. The cell dimensions are approximately 114 mm long, 48 mm wide, and 73 mm thick, with a weight of approximately 1.35 kg. The cell operates within a charging temperature range of 0 to 55°C and a discharging temperature range of -20 to 55°C, offering a service life exceeding 4,000 cycles at 80% depth of discharge (DoD). It is characterized by high thermal stability and safety of use, which, combined with low internal resistance, ensures high efficiency and minimal energy losses. Its long service life and excellent performance make the EVE 50 Ah cell particularly recommended for applications requiring intensive charging and discharging cycles [43].

### Koncepcja realizacji magazynu energii na ogniwach pryzmatycznych z odzysku LiFePO<sub>4</sub> EVE 50 Ah

Drugi rozpatrywany magazyn zawiera ogniwo litowo-żelazowo-fosforanowe (LiFePO<sub>4</sub>) o pojemności nominalnej 50 Ah i napięciu nominalnym 3,2 V charakteryzuje się zakresem pracy od 2,5 V do 3,65 V, przy maksymalnym napięciu ładowania 3,65 V i minimalnym napięciu rozładowania 2,5 V. Parametry elektryczne obejmują: standardowy prąd ładowania 25 A (0,5 C) z możliwością zwiększenia do 50 A (1 C), standardowy prąd rozładowania 50 A (1 C) z maksymalną wartością 150 A (3 C) oraz rezystancję wewnętrzną nieprzekraczającą 0,2 mΩ. Wymiary ogniw wynoszą około 114 mm długości, 48 mm szerokości i 73 mm grubości, przy masie około 1,35 kg. Ogniwo pracuje w zakresie temperatur ładowania od 0 do 55°C i rozładowania od -20 do 55°C, oferując żywotność przekraczającą 4000 cykli przy 80% głębokości rozładowania (DoD). Charakteryzuje się wysoką stabilnością termiczną i bezpieczeństwem użytkowania, co w połączeniu z niską rezystancją wewnętrzną zapewnia wysoką wydajność i minimalne straty energii. Długa żywotność i bardzo dobre parametry sprawiają, że ogniwo EVE 50 Ah jest szczególnie polecane do zastosowań wymagających intensywnego cyklu ładowania i rozładowania [43].

**Table 6.** Comparison of the purchase costs of LiFePO<sub>4</sub> cells – new and recycled  
**Tabela 6.** Porównanie kosztów zakupu ogniw LiFePO<sub>4</sub> – nowych oraz z odzysku

LiFePO <sub>4</sub> EVE 50 Ah	Example cost of a recycled cell [PLN gross] / Przykładowy koszt ogniw z odzysku [zł brutto]	Example cost of a new cell in sales advertisements [PLN gross] / Przykładowy koszt ogniw nowego w ogłoszeniach sprzedażowych [zł brutto]	Number of cells in stock [pcs.] / Liczba ogniw na magazyn [szt.]	Cost of purchasing recycled cells for stock [PLN gross] / Koszt zakupu ogniw z odzysku na magazyn [zł brutto]	Cost of purchasing new cells for stock [PLN gross] / Koszt zakupu nowych ogniw na magazyn [zł brutto]
16 S 1 P-50 Ah	76.50	130	16	1224	2080
16 S 1 P-50 Ah	83.20	150	16	1331.20	2400
16 S 2P-100 Ah	76.50	130	32	2248	4160
16 S 2 P-100 Ah	83.20	150	32	2662.40	4800

**Source:** Own elaboration.  
**Źródło:** Opracowanie własne.

The battery in question has the following configuration: 16 S 1 P, 51.2 V (58.4 V max.). The weight of the cells in the 16 S 1 P (50 Ah) configuration is 21.6 kg, and in the 16 S 2 P (100 Ah) configuration – 43.2 kg. The cells are connected by flexible busbars cooper tightened with screws using a torque wrench. A balanced force was used during tightening so as not to damage the cell pin. Flexible busbars cooper [44] perform better than regular copper sheets because they transfer stress during cell operation. They have a bend in the middle that transfers stress. The storage unit is connected to Smart BMS. The cables used are 10 AWG silicone cables for a 16 S 2 P storage unit configuration, allowing for higher power consumption from the storage unit and faster charging.

Although the reuse of lithium-ion cells has potential environmental and economic benefits, it also carries a number of risks. These risks should be carefully considered before deciding to reuse cells. Below is a detailed discussion of the potential risks.

## Security risks

Lithium-ion cells that have been used previously may have suffered mechanical damage or degradation as a result of charging and discharging cycles, overheating, or improper storage. This damage may not be visible at first glance, but it can seriously affect the safety of the cell. Damaged cells are more prone to overheating, ignition, and even explosion (known as thermal runaway). Accurately determining the technical condition of a used lithium-ion cell is very difficult and requires specialized testing and equipment. Simple voltage and capacity tests may not reveal hidden problems such as microcracks, electrolyte degradation, or increased internal resistance. Uncertainty about the actual technical condition increases the risk of failure and dangerous situations. Degradation processes in lithium-ion cells can lead to an increased risk of internal short circuits, which can cause

Omawiany magazyn ma następującą konfigurację: 16 S 1 P, 51,2 V (58,4 V max.). Waga ogniw w konfiguracji 16 S 1 P (50 Ah) wynosi 21,6 kg, a w konfiguracji 16 S 2 P (100 Ah) – 43,2 kg. Ogniw łącznie są poprzez miedziane blachy łączeniowe (ang. *flexible busbars cooper*) dokręcone śrubami za pomocą klucza dynamometrycznego. Przy dokręcaniu użyto wyważonej siły, tak aby nie uszkodzić pinu ogniw. Flexible busbars cooper [44] sprawdzają się lepiej niż zwykłe blachy miedziane, ponieważ przenoszą naprężenia w czasie pracy ogniw. Po środku mają wygięcie, które przenosi naprężenia. Magazyn podłączony jest do Smart BMS. Przewody zastosowane to silikonowe 10 AWG dla konfiguracji magazynu w wersji 16 S 2 P i wykorzystaniu możliwości poboru większej mocy z magazynu oraz szybszego naładowania.

Ponowne wykorzystanie ogniw litowo-jonowych, choć niesie ze sobą potencjalne korzyści ekologiczne i ekonomiczne, wiąże się również z szeregiem zagrożeń. Należy dokładnie rozważyć te zagrożenia przed podjęciem decyzji o ponownym wykorzystaniu ogniw. Poniżej przedstawiono szczegółowe omówienie potencjalnych zagrożeń.

## Zagrożenia związane z bezpieczeństwem

Ogniw litowo-jonowe, które były wcześniej używane, mogły ulec uszkodzeniom mechanicznym lub degradacji w wyniku cykli ładowania i rozładowania, przegrzania, czy nieprawidłowego przechowywania. Te uszkodzenia mogą być niewidoczne na pierwszy rzut oka, ale mogą poważnie wpłynąć na bezpieczeństwo ogniw. Uszkodzone ogniw są bardziej podatne na przegrzanie, zapłon, a nawet eksplozję (tzw. *thermal runaway*). Dokładne określenie stanu technicznego używanego ogniw litowo-jonowego jest bardzo trudne i wymaga specjalistycznych badań i sprzętu. Proste testy napięcia i pojemności mogą nie ujawnić ukrytych problemów, takich jak mikropęknięcia, degradacja elektrolitu czy wzrost oporu wewnętrznego. Brak pewności co do rzeczywistego stanu technicznego zwiększa ryzyko awarii i niebezpiecznych sytuacji. Procesy degradacji w ogniwach litowo-jonowych mogą

a rapid rise in temperature and ignition of the cell. Reusing cells increases the risk of short circuits compared to new cells. Used lithium-ion cells can behave unpredictably. Their characteristics, such as capacity, voltage, and discharge current, can change in an uncontrolled manner. This unpredictable behaviour can be a problem in applications where power stability and reliability are required [45].

### Risks related to performance and functionality

Used lithium-ion cells will always have reduced capacity and power compared to new cells. Aging and degradation processes irreversibly reduce their ability to store and deliver energy. Reusing cells means accepting reduced performance compared to new solutions. Research shows that recycled lithium-ion cells can lose up to 20–30% of their initial capacity. Used cells have a shorter remaining life than new ones. Reusing them shortens the total operating time in a new application. This can lead to more frequent cell replacement and increased costs in the long run. The life cycle characteristics of used cells may be unstable. Their ability to withstand successive charge and discharge cycles may be significantly reduced and more variable than that of new cells. This can cause faster degradation and failure in the application [48].

### Risks related to quality and reliability

Currently, there are no uniform and widely accepted quality standards for the reuse of lithium-ion cells. It is difficult to ensure consistent quality and reliability of cells from different sources and with different usage histories. The market for reusing lithium-ion cells is vulnerable to counterfeits and low-quality cells. Uninformed or dishonest sellers may put defective, dangerous, or cells with unknown histories into circulation. Purchasing cells from unreliable sources increases the risk of problems. In some cases, recycled cells do not meet the technical requirements for industrial applications [47]. Monitoring and managing used lithium-ion cells in a new application can be more complicated than with new cells. Their unpredictable behaviour and varying technical condition make it difficult to optimally control and diagnose the system.

### Environmental threats

Damaged or degraded lithium-ion cells may leak substances. Improper handling of used cells, especially damaged ones, can lead to environmental pollution and pose a risk to human health.

prowadzić do wzrostu ryzyka zwarc wewnątrznych, które mogą powodować gwałtowny wzrost temperatury i zapłon ogniwa. Ponowne wykorzystanie ogni w zwiększa ryzyko wystąpienia zwarc w porównaniu z nowymi ogniwami. Używane ogniwa litowo-jonowe mogą zachowywać się w sposób nieprzewidywalny. Ich charakterystyka, taka jak pojemność, napięcie i prąd rozładowania, może ulec zmianie w niekontrolowany sposób. To nieprzewidywalne zachowanie może stanowić problem w aplikacjach, gdzie wymagana jest stabilność i niezawodność zasilania [45].

### Zagrożenia związane z wydajnością i funkcjonalnością

Używane ogniwa litowo-jonowe zawsze będą miały zmniejszoną pojemność i moc w porównaniu do nowych ogni w. Procesy starzenia i degradacji nieodwracalnie zmniejszają ich zdolność do magazynowania i dostarczania energii. Ponowne wykorzystanie ogni w oznacza akceptację obniżonej wydajności w porównaniu z nowymi rozwiązaniami. Badania wykazują, że ogniwa litowo-jonowe z recyklingu mogą tracić nawet 20–30% swojej początkowej pojemności. Używane ogniwa mają krótszą pozostałą żywotność niż nowe. Ich ponowne wykorzystanie skraca całkowity czas eksploatacji w nowej aplikacji. Może to prowadzić do częstszej wymiany ogni w i zwiększonych kosztów w dłuższej perspektywie. Charakterystyka cykli życia używanych ogni w może być niestabilna. Ich zdolność do wytrzymywania kolejnych cykli ładowania i rozładowania może być znacznie obniżona i bardziej zmienna niż w przypadku nowych ogni w. To może powodować szybszą degradację i awarię w aplikacji [46].

### Zagrożenia związane z jakością i niezawodnością

Obecnie brakuje jednolitych i powszechnie akceptowanych standardów jakości dla ponownego wykorzystania ogni w litowo-jonowych. Trudno jest zapewnić spójną jakość i niezawodność ogni w pochodzących z różnych źródeł i o różnej historii użytkowania. Rynek ponownego wykorzystania ogni w litowo-jonowych jest podatny na ryzyko podróbek i ogni w niskiej jakości. Nieświadomi lub nieuczciwi sprzedawcy mogą wprowadzać do obiegu ogniwa niesprawne, niebezpieczne lub o nieznannej historii. Zakup ogni w z niepewnych źródeł zwiększa ryzyko problemów. W niektórych przypadkach ogniwa z recyklingu nie spełniają wymagań technicznych dla zastosowań przemysłowych [47]. Monitorowanie i zarządzanie używanymi ogni wami litowo-jonowymi w nowej aplikacji może być bardziej skomplikowane niż w przypadku nowych ogni w. Ich nieprzewidywalne zachowanie i zróżnicowany stan techniczny utrudniają optymalne sterowanie i diagnostykę systemu.

### Zagrożenia środowiskowe

Z uszkodzonych lub zdegradowanych ogni w litowo-jonowych mogą wyciekać substancje. Nieprawidłowe postępowanie z używanymi ogni wami, zwłaszcza uszkodzonymi, może prowadzić

In 2021, there were several incidents of fires in energy storage facilities where second-life cells were used. Some recycling facilities in developing countries do not meet environmental standards, leading to soil and water contamination. Improper reuse of lithium-ion cells can make them harder to recycle later on. Modifications and alterations to cells during reuse can complicate the process of recovering valuable materials from them at the end of their second life [48].

## Analysis and conclusions

When planning the construction of an energy storage facility using recycled cells, the first thing we need to ask ourselves is: What is the maximum current we will use to charge the energy storage facility? What is the maximum current we will use to discharge it? Based on this assumption, we can proceed to select the cells. In the case of the analysed Li-Ion 18650 and LiFePO<sub>4</sub>, the cost of the cells used is similar, assuming 13 S 30 P 105 Ah (18650) and 16 S 2 P 100 Ah (LiFePO<sub>4</sub>). However, in the case of Li-Ion cells, an additional significant cost is the welding of cells by companies with the appropriate equipment and technical conditions (the cost of baskets, nickel tape, and positive pin insulators ranges from PLN 3.60 to PLN 4.05 gross per piece, which, with 390 pieces, amounts to PLN 1,404 to PLN 1,579.50). In the case of LiFePO<sub>4</sub> cells, connection costs range from PLN 105 to PLN 250, depending on the type. It will therefore be faster and more economical to assemble the cells by screwing them together. The data provided comes from advertisements by companies professionally involved in the construction and welding of Li-Ion cell packs, as well as offers for the sale of materials needed for construction.

The weight of 18650 cells is an advantage. It is 18.3 kg compared to 43.2 kg for LiFePO<sub>4</sub> cells. Lighter cells are easier to carry, manufacture, and purchase. The remaining costs are similar: cables, insulation, Smart BMS. LiFePO<sub>4</sub> cells in the proposed configuration can be charged/discharged with a higher current, which means that more devices can be connected and the storage capacity can be reduced. Faster charging from a hybrid inverter is possible. LiFePO<sub>4</sub> cells generate less heat and are safer to operate.

Another advantage of LiFePO<sub>4</sub> prismatic cells is that the storage facilities are built from recycled cells. These cells have been given a second life and can continue to be used in energy storage facilities. In the event of a decline in the performance of 18650 cells, it is more difficult to replace a single cell in the pack (another process of safely dismantling nickel or copper plates; diagnostics to determine which cell is damaged, causing the damaged cell to undercharge and be cut off more quickly by the BMS).

In the case of a LiFePO<sub>4</sub> storage system, disassembly is easier by unscrewing the flexible bushbars and replacing the damaged cell with another one that has been previously charged to the voltage of the other cells in the storage system. We can

do zanieczyszczenia środowiska i zagrożenia dla zdrowia ludzi. W 2021 roku odnotowano kilka incydentów pożarów w magazynach energii, gdzie wykorzystano ogniwa z drugiego obiegu. Niektóre zakłady recyklingu w krajach rozwijających się nie spełniają standardów ekologicznych, co prowadzi do skażenia gleby i wody. Nieprawidłowe ponowne wykorzystanie ogniw litowo-jonowych może utrudnić ich późniejszy recykling. Modyfikacje i przeróbki ogniw w procesie ponownego wykorzystania mogą skomplikować proces odzyskiwania cennych materiałów z nich po zakończeniu ich drugiej żywotności [48].

## Analiza i wnioski

Planując budowę magazynu energii z ogniw z odzysku, musimy najpierw zadać sobie następujące dwa pytania: Jakim maksymalnym prądem będziemy ładować magazyn energii? Jakim maksymalnym prądem będziemy go rozładowywać? Na podstawie tego założenia przystępujemy do wyboru ogniw. W przypadku analizowanych Li-Ion 18650 oraz LiFePO<sub>4</sub> koszt ogniw używanych jest podobny przy założeniu 13 S 30 P 105 Ah (18650) i 16 S 2 P 100 Ah (LiFePO<sub>4</sub>). Natomiast w przypadku ogniw Li-Ion dodatkowym dużym kosztem jest zgrzewanie ogniw przez firmy dysponujące odpowiednim sprzętem i warunkami technicznymi (koszt koszyków, taśmy niklowej, izolatorów na pin pozytywny waha się między 3,60 do 4,05 zł brutto za szt., co przy liczbie 390 szt. daje kwotę od 1404 do 1579,50 zł). W przypadku ogniw LiFePO<sub>4</sub> koszty połączeń wahają się od 105 zł do 250 zł w zależności od rodzaju. Szybszy i oszczędniejszy będzie więc montaż ogniw poprzez skręcenie. Podane dane pochodzą z ogłoszeń firm profesjonalnie zajmujących się budową, zgrzewaniem pakietów ogniw Li-Ion oraz ofertami sprzedaży materiałów potrzebnych do budowy.

Na korzyść ogniw 18650 przemawia waga. Wynosi ona 18,3 kg w porównaniu do 43,2 kg ogniw LiFePO<sub>4</sub>. Lżejsze ogniwa wiążą się z łatwiejszym przenoszeniem, wykonaniem i kupnem obudowy.

Pozostałe koszty są podobne: przewodów, izolacji, Smart BMS. Ogniwa LiFePO<sub>4</sub> w zaproponowanej konfiguracji można obciążać większym prądem ładowania/rozładowania, co powoduje, że można wpinać więcej urządzeń i bardziej odciążać magazyn. Możliwe jest szybsze ładowanie z inwertera hybrydowego. Ogniwa LiFePO<sub>4</sub> mniej się grzeją i charakteryzują się większym bezpieczeństwem pracy.

Kolejnym pozytywnym działającym na korzyść ogniw pryzmatycznych LiFePO<sub>4</sub> jest to, że zbudowane magazyny składają się z ogniw z odzysku. Takich, które dostały drugie życie i mogą dalej być wykorzystywane w magazynach energii. W przypadku spadków parametrów pracy ogniw 18650 trudniej jest wymienić pojedyncze ogniwo w pakiecie (kolejny proces bezpiecznego demontażu blach niklowych bądź miedzianych; diagnostykę, które ogniwo jest uszkodzone, powodując niedoładowanie uszkodzonej celi i szybsze odcięcie przez BMS).

W przypadku magazynu z LiFePO<sub>4</sub> demontaż jest łatwiejszy poprzez odkręcenie flexible bushbars i wymianę uszkodzonego ogniwa na inne, wcześniej doładowane do napięcia reszty ogniw

additionally build another storage unit based on these cells and connect them by setting one as the master in the BMS and connecting subsequent BMS units via RS485 communication. Figure 9 shows a diagram of connecting 16 LiFePO<sub>4</sub> cells to Smart BMS, which, in new solutions improving safety, monitors the temperature of each cell and protects them against voltage.

w magazynie. Możemy dodatkowo wykonać kolejny magazyn zbudowany na tych ogniwach i połączyć poprzez ustawienie w BMS jednym jako master i podpinanie kolejnych BMS poprzez komunikację RS485. Na rycinie 9 przedstawiony jest schemat połączenia 16 ogniw LiFePO<sub>4</sub> do Smart BMS, który w nowych rozwiązaniach poprawiających bezpieczeństwo monitoruje temperaturę każdej z cel oraz zabezpiecza je napięciowo.

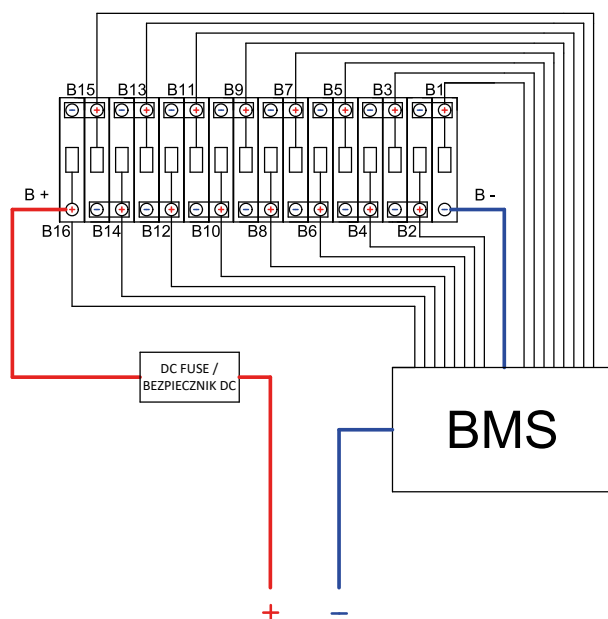


Figure 3. Proposed connections with secure temperature monitoring in each cell, version 16 S

Rycina 3. Proponowane połączenia z bezpiecznym monitorowaniem temperatury w każdej z celi, wersja 16 S

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

### Storage on LGMJ1 18650 13 S 30 P 48 V 103.5 Ah cells

The safe charging current for the storage unit (recommended by the manufacturer) is  $30\text{ P} \times 1.7\text{ A} = 51\text{ A}$ . This is the parameter for a new cell described in the data sheet. To improve safety, since we use recycled cells and do not know the exact number of cycles and operating conditions, we reduce the current to  $1.2\text{ A} \times 30\text{ P} = 36\text{ A}$ . The safe discharge current of the storage unit (recommended by the manufacturer) is  $30\text{ P} \times 3.4\text{ A} = 102\text{ A}$ . This is the parameter for a new cell described in the data sheet. For the same reason as above, we reduce the current to  $2.7\text{ A} \times 30\text{ P} = 81\text{ A}$ . The first storage unit has 4968 Wh, which translates into powering a 1000 W device for almost 5 hours of operation. In this case, when using SMART BMS 13 S 150 A to operate with a reserve and prevent the power transistors from overheating, we can set the charging current to a maximum of 40 A and the discharging current to a maximum of 90 A to protect the cells. The cell capacity will change as the discharging current increases. As a result, at high current values, the capacity measured during discharge will be lower than the nominal

### Magazyn na ogniwach LGMJ1 18650 13 S 30 P 48 V 103,5 Ah

Prąd bezpieczny ładowania magazynu (zalecany przez producenta) to  $30\text{ P} \times 1,7\text{ A} = 51\text{ A}$ . Jest to parametr dla ogniwa nowego opisany w karcie katalogowej. Dla poprawy bezpieczeństwa, ponieważ wykorzystujemy ogniwa z odzysku i nie znamy dokładniej liczby cykli oraz warunków pracy, zmniejszamy prąd do  $1,2\text{ A} \times 30\text{ P} = 36\text{ A}$ . Prąd bezpieczny rozładowania magazynu (zalecany przez producenta) to  $30\text{ P} \times 3,4\text{ A} = 102\text{ A}$ . Jest to parametr dla ogniwa nowego opisany w karcie katalogowej. Z tego samego powodu jak wyżej zmniejszamy prąd do  $2,7\text{ A} \times 30\text{ P} = 81\text{ A}$ . Pierwszy magazyn ma 4968 Wh, co przekłada się na zasilanie urządzenia o mocy 1000 W przez prawie 5 godzin pracy. W tym przypadku, gdy zastosujemy SMART BMS 13 S 150 A, tak aby pracował z zapasem i tranzystory mocy nie nagrzewały się możemy ustawić prąd ładowania jako max. 40 A i prąd rozładowania jako max. 90 A, tak aby zabezpieczyć ogniwa. Pojemność ogniwa będzie się zmieniać wraz ze wzrostem prądu rozładowania. W efekcie przy wysokich wartościach prądu pojemność mierzona podczas rozładowania będzie niższa niż pojemność

capacity, which is specified for low current values. High current values also contribute to cell degradation, as they generate greater heat losses. This, in turn, has a negative impact on cell life. In this case, we are dealing with recycled cells, which we are giving a second life.

### EVE LiFePO4 prismatic cell battery 50 Ah 16 S 2 P 51.2 V 100 Ah

The safe charging current for the storage unit (recommended by the manufacturer) is  $2 P \times 50 A (0.5 C, 25 A \times 2 P) = 50 A$ . To improve safety, since we use recycled cells and do not know the exact number of cycles and operating conditions, we reduce the current to 35 A. The safe discharge current of the storage unit (recommended by the manufacturer) is  $2 P \times 100 A (1 C, 50 A \times 2 P) = 100 A$ . For safety reasons, as above, we reduce the current to 80 A. The storage unit in question has 5120 Wh, which provides 5 hours of power to a 1000 W device.

In this case, when using SMART BMS 16 S 150 A so that it operates with a reserve and the power transistors do not heat up significantly, the charging current can be set to a maximum of 35 A and the discharging current to a maximum of 80 A. This will protect the cells. Naturally, it is possible to reduce the charging and discharging current if we decide that we do not need such high parameters for our purposes. The user has access to control these parameters and monitor the current operation of the storage facility using SMART BMS. Other cells available from recycling, potentially suitable for energy storage construction, are presented in Table 7.

nominalna, która jest podawana dla prądu o niskich wartościach. Wysokie wartości natężenia prądu mają również wpływ na degradację ogniwa, ponieważ generowane są większe straty ciepłe. To z kolei wpływa negatywnie na żywotność ogniwa. W tym przypadku mamy do czynienia z ogniwami z odzysku, którym dajemy drugie życie.

### Magazyn na ogniwach pryzmatycznych EVE LiFePO4 50 Ah 16 S 2 P 51,2 V 100 Ah

Bezpieczny prąd ładowania magazynu (zalecany przez producenta) to  $2 P \times 50 A (0,5 C, 25 A \times 2 P) = 50 A$ . Dla poprawy bezpieczeństwa, ponieważ wykorzystujemy ogniwa z odzysku i nie znamy dokładnie liczby cykli oraz warunków pracy, zmniejszamy prąd do 35 A. Prąd bezpieczny rozładowania magazynu (zalecany przez producenta) to  $2 P \times 100 A (1 C, 50 A \times 2 P) = 100 A$ . Dla poprawy bezpieczeństwa, tak jak powyżej, zmniejszamy prąd do 80 A. Rozpatrywany magazyn ma 5120 Wh, co daje 5 godzin zasilania urządzenia o mocy 1000 W.

W tym przypadku, gdy zastosujemy SMART BMS 16 S 150 A, tak aby pracował z zapasem i tranzystory mocy się nie nagrzewały się znacznie, można ustawić prąd ładowania jako max. 35 A i prąd rozładowania jako max. 80 A. Pozwoli to zabezpieczyć ogniwa. Oczywiście istnieje możliwość obniżenia prądu ładowania oraz rozładowania, jeśli uznamy, że nie potrzebujemy do naszych celów aż tak wysokich parametrów. Użytkownik ma dostęp do kontroli tych parametrów oraz monitoringu bieżącej pracy magazynu przy zastosowaniu SMART BMS. Inne ogniwa dostępne z odzysku, potencjalnie nadające się do budowy magazynu energii, przedstawione są w tabeli 7.

**Table 7.** Cells for the construction of energy storage facilities  
**Tabela 7.** Ogniwa do budowy magazynu energii

Cell type / Rodzaj ogniwa	Cell capacity [Ah] / Pojemność ogniwa [Ah]	Storage configuration / Konfiguracja magazynu	Cell charging current [A] / Prąd ładowania ogniwa [A]	Cell discharge current [A] / Prąd rozładowania ogniwa [A]	Storage weight [kg] / Waga magazynu [kg]	Storage capacity [Ah] / Pojemność magazynu [Ah]
Sony VTC5 18650	2.5	13 S 30 P	2.50	35 (in the package under BMS control)	17.1	75
Samsung 35E 18650	3.4	13 S 30 P	1.70	8 (in the package under BMS control)	18.7	102
Molicel P-26A 18650	2.6	13 S 30 P	2.60	35 (in the package under BMS control)	18.7	78
Samsung 40T 21700	4	13 S 30 P	2	35 (in the package under BMS control)	27.3	120
LG 50E 21700	5	13 S 30 P	2.45	9.8 (in the package under BMS control)	26.9	150
Molicel 21700	5	13 S 30 P	5	60 (in the package under BMS control)	27.6	150

*Dalszy ciąg tabeli na następnej stronie*

Cell type / Rodzaj ogniwa	Cell capacity [Ah] / Pojemność ogniwa [Ah]	Storage configuration / Konfiguracja magazynu	Cell charging current [A] / Prąd ładowania ogniwa [A]	Cell discharge current [A] / Prąd rozładowania ogniwa [A]	Storage weight [kg] / Waga magazynu [kg]	Storage capacity [Ah] / Pojemność magazynu [Ah]
EVE LiFePO4	100	16 S 1 P	50	100 (in the package under BMS control)	31.6	100
ELERIX LiFePO4	100	16 S 1 P	50	100 (in the package under BMS control)	32.8	100
WINSTON LiFePO4	100	16 S 1 P	50	100 (in the package under BMS control)	57.6	100

Source: Own elaboration.  
Źródło: Opracowanie własne.

## Summary and future solutions

Safety is a key consideration when building a storage facility using recycled cells. A careless approach can result in the energy storage facility malfunctioning, or even short-circuiting and catching fire. In the case of cylindrical Li-Ion 18650 and 21700 cells, it is necessary to check the cells before the welding process for mechanical damage, dents (side and positive and negative terminals), and damage to the cell insulation. The cells should be tested on a tester for capacity, heating during discharge testing, and internal cell resistance. Cells for construction should be from the same series and year. It is not recommended to use different types of cell series and years. The reasons are listed below.

1. Cells from different series or years may have slightly different capacities. Combining cells with different capacities can lead to uneven discharging and charging, which in turn reduces the overall capacity of the storage system and shortens the life of the cells.
2. The internal resistance of cells may vary depending on the series and year of production. Differences in resistance can cause uneven heating of cells during operation, which negatively affects their performance and durability. Small differences in cell voltage can lead to current flow between cells, resulting in energy loss and additional load on cells with lower voltage.
3. Combining cells with different degrees of wear can lead to faster wear of older cells and a shorter service life for the entire storage system.
4. Using cells from the same series and year of manufacture facilitates energy storage management and monitoring. The battery management system (BMS) can be better adapted to homogeneous cells, ensuring optimal performance and safety.
5. Differences in cell parameters may increase the risk of overheating, overcharging, or deep discharge, which in extreme cases may lead to failure or fire.

## Podsumowanie i przyszłe rozwiązania

Bezpieczeństwo przy budowaniu magazynu z ogniw pochodzących z odzysku jest kluczowym aspektem. Lekceważące podejście może skutkować wadliwą pracą magazynu energii, a nawet zwarciami i pożarem. Cylindryczne ogniwa Li-Ion 18650, 21700 powinny być sprawdzone przed procesem zgrzewania pod kątem uszkodzeń mechanicznych, wgniecień (bocznych oraz terminali pozytywnego, negatywnego), uszkodzeń izolacji ogniwa. Ogniwa powinny być zbadane na testerze pod względem pojemności, grzania się podczas testu rozładowania oraz rezystancji wewnętrznej ogniwa. Ogniwa użyte do budowy powinny być z tej samej serii i roku. Nie jest zalecane stosowanie różnych rodzajów serii ogniw oraz roczników. Poniżej wypunktowano powody.

1. Ogniwa z różnych serii lub lat mogą mieć nieznacznie różną pojemność. Łączenie ogniw o różnej pojemności może prowadzić do nierównomiernego rozładowywania i ładowania, co z kolei obniża ogólną pojemność magazynu i skraca żywotność ogniw.
2. Rezystancja wewnętrzna ogniw może się różnić w zależności od serii i roku produkcji. Różnice w rezystancji mogą powodować nierównomierne nagrzewanie się ogniw podczas pracy, co negatywnie wpływa na ich wydajność i trwałość. Niewielkie różnice w napięciu ogniw mogą prowadzić do przepływu prądu między nimi, co powoduje straty energii i dodatkowe obciążenie dla ogniw o niższym napięciu.
3. Łączenie ogniw o różnym stopniu zużycia może prowadzić do szybszego zużycia się starszych ogniw i skrócenia żywotności całego magazynu.
4. Używanie ogniw z tej samej serii i roku produkcji ułatwia zarządzanie i monitorowanie magazynu energii. System zarządzania baterią (BMS) może być lepiej dostosowany do jednorodnych ogniw, co zapewnia optymalną pracę i bezpieczeństwo.
5. Różnice w parametrach ogniw mogą zwiększać ryzyko przegrzania, przeładowania lub głębokiego rozładowania, co w skrajnych przypadkach może prowadzić do awarii lub pożaru.

In summary, using cells from the same series and year of manufacture is crucial for ensuring optimal performance, durability, and safety of the energy storage system. This avoids problems associated with differences in cell parameters and ensures uniform aging of all components.

Recommended practices for the construction of energy storage facilities include:

- not using cells that overheat during discharge testing (to avoid future safety hazards);
- using a thermal imaging camera to monitor and reject poor-quality cells;
- using insulators on the positive terminal to protect the batteries from short-circuiting during welding or later use, using baskets in which the cells are placed before welding, not gluing the cells together, as they will heat each other up quickly;
- using pure nickel tape with appropriate parameters to connect the cells so that it conducts the current assumed in the proposed solution;
- using a proven welding machine with the appropriate power and parameters so that it welds the correct thickness of nickel tape to the cells, or entrusting the welding process to a company if you are unsure of your skills;
- during the welding process, paying attention to weld the tape to the pins very precisely, especially to the positive pin, because missing the welding electrode can cause the tape to burn and damage the cell; the negative electrode is the flat bottom of the cell, so in this case the welding process is easier;
- after the cell welding process is complete, using insulation that meets the standards (epoxy glass, fiberglass between 1–2 mm thick). Keep in mind that the storage unit is heavy and may be exposed to mechanical damage, but the insulation also serves as fire protection for the cells.;
- using reinforced tape to secure corners, and high-temperature polyamide insulating tape to tape and insulate under cables, or the power cables and BMS themselves;
- using only appropriate cables with a cross-section suitable for the planned maximum current consumption and sockets;
- selecting Smart BMS as a secure system for monitoring warehouse operations during charging/discharging processes, temperature monitoring, and cell balancing in order to extend the service life of the warehouse;
- setting the BMS so that it does not discharge the storage to the lowest threshold of 2.5 V (deep discharge) per cell, which allows for a larger share of energy to remain in the storage and at the same time does not shorten the life of the cells;
- after completing the entire warehouse and connecting it, checking with a thermal imaging camera whether individual components or targets are not overheating before placing them in the housing;
- making a housing to protect the storage facility against mechanical damage, flooding, and moisture.

Podsumowując, używanie ogniw z tej samej serii i roku produkcji jest kluczowe dla zapewnienia optymalnej wydajności, trwałości i bezpieczeństwa magazynu energii. Pozwala to na uniknięcie problemów związanych z różnicami w parametrach ogniw i zapewnia równomierne starzenie się wszystkich komponentów.

Do zalecanych praktyk przy budowie magazynów energii należą natomiast:

- niekorzystanie z ogniw, które podczas testu rozładowania grzeją się zbyt mocno (aby nie były zagrożeniem bezpieczeństwa w przyszłości);
- używanie kamery termowizyjnej w celu monitorowania i odrzucenia słabych jakościowo ogniw;
- zastosowanie izolatorów na terminal dodatni tak, aby zabezpieczyć baterie przed zwarcie podczas zgrzewania lub w późniejszej eksploatacji, stosowanie koszyków, do których wkładamy ogniwa przed zgrzewaniem, nieklejenie ogniw ze sobą, ponieważ będą się grzać wzajemnie od siebie szybciej;
- używanie do łączenia ogniw taśmy z czystego niklu o odpowiednich parametrach, tak aby przewodziła prąd założony w proponowanym rozwiązaniu;
- korzystanie ze sprawdzonej zgrzewarki o odpowiedniej mocy i parametrach, tak aby zgrzewała odpowiednią grubość taśmy niklowej do ogniw lub też powierzenie procesu zgrzewania firmie, jeśli nie jest się pewnym co do swoich umiejętności;
- podczas procesu zgrzewania zwracanie uwagi, aby bardzo precyzyjnie zgrzewać taśmę do pinów, w szczególności do pinu dodatniego, ponieważ chybienie elektrodą zgrzewającą może spowodować przepalanie taśmy i uszkodzenie ogniwa; elektroda ujemna jest płaskim dnem ogniwa, więc w tym przypadku proces zgrzewania jest łatwiejszy;
- po zakończonym procesie zgrzewania ogniw w pakiet zastosowanie spełniającej normy izolacji (szkło epoksydowe, włókno szklane między 1–2 mm grubości). Należy pamiętać, że magazyn jest ciężki i może być narażony na uszkodzenia mechaniczne, ale izolacja spełnia także funkcję zabezpieczenia pożarowego ogniw;
- stosowanie taśmy zbrojonej do zabezpieczenia narożników, natomiast wysokotemperaturowej taśmy izolacyjnej polamidowej do podklejania i izolowania pod przewodami, czy też samych przewodów zasilania oraz BMS;
- stosowanie tylko odpowiednich przewodów o przekroju dopasowanym do planowanego maksymalnego poboru prądu oraz gniazda;
- dobór Smart BMS jako bezpiecznego systemu monitorującego pracę magazynu podczas procesów ładowania/rozładowania, monitorowania temperatury oraz balansowania ogniw, w celu wydłużenia żywotności magazynu.
- ustawienie BMS tak, aby nie rozładowywał magazynu aż do najniższego progu 2,5 V (ang. *deep discharge*) na celę, co pozwala na pozostawienie większego udziału energii w magazynie i zarazem nie skraca żywotności ogniw;

The storage facility can be placed in a custom-made enclosure or in a rack cabinet, which will also be easier to move. When using LiFePO<sub>4</sub> prismatic cells, it is important to check the condition of the cells by performing a performance test (discharge and monitored cell temperatures) and checking the technical condition to ensure that no pins are bent or broken and that the cell is not deformed. The use of flexible busbars for connection will increase the safety of the battery during operation, as will the use of insulators (epoxy glass spacers between cells and at the bottom and sides of the battery).

LiFePO<sub>4</sub> (lithium iron phosphate) cells are generally considered safer than Li-Ion (lithium-ion) cells. Here are the main reasons:

- thermal stability: LiFePO<sub>4</sub> batteries are more resistant to overheating and have a lower risk of ignition or explosion compared to Li-Ion batteries;
- lower sensitivity to damage: LiFePO<sub>4</sub> cells are less susceptible to mechanical damage or short circuits;
- chemical safety: LiFePO<sub>4</sub> chemistry is less reactive than traditional Li-Ion cells, reducing the risk of fire;
- longer service life: LiFePO<sub>4</sub> batteries typically have a higher number of charge/discharge cycles, which translates into greater durability.

In summary, if safety is a priority, LiFePO<sub>4</sub> cells are the better choice. An important aspect is monitoring the temperature of the storage cells during operation. Standard SMART BMS JK, Daly BMS, and ANT BMS systems come with two to four sensors that monitor storage temperatures. A small number of factory-installed sensors makes it impossible to monitor the temperature of all cells, as in the last example discussed (16 cells) or the one preceding it (13 cells). During monitoring, we can detect excessive cell heating and prevent potential cell self-ignition.

A noteworthy new solution that is appearing in some companies that build energy storage facilities is temperature monitoring of all cells by mounting PCB boards with temperature sensors on thermally conductive adhesive and monitoring the voltage on each cell, then sending the information to the BMS. This provides a constant overview of the storage unit's operation. If the temperature in the cell rises during loading/unloading, the storage unit is immediately shut down and an error code is displayed.

- po wykonaniu całego magazynu i podłączeniu sprawdzenie kamerą termowizyjną czy poszczególne elementy czy też cele, przed umieszczeniem w obudowie nie grzeją się zbyt mocno;
- wykonanie obudowy, aby zabezpieczyć magazyn przed uszkodzeniami mechanicznymi, zalaniem, wilgocią.

Magazyn może zostać umieszczony w wykonanej pod wymiar obudowie lub w szafie rackowej, która będzie też łatwiejsza do przemieszczenia. W przypadku zastosowań ogniów pryzmatycznych LiFePO<sub>4</sub> ważne jest sprawdzenie stanu ogniów poprzez test sprawności (rozładowanie i monitorowane temperatury ogniwa) i sprawdzenie stanu technicznego, czy któryś pin nie jest skrzywiony, podłamany, ogniwo nie jest odkształcone. Wykorzystanie *flexible busbars* do łączenia zwiększy bezpieczeństwo magazynu podczas pracy, podobnie jak stosowanie izolatorów (przekładek ze szkła epoksydowego między ogniwami oraz od dołu i na bokach magazynu).

Ogniwa LiFePO<sub>4</sub> (fosforan żelazowo-litowy) są ogólnie uważane za bezpieczniejsze niż ogniwa Li-Ion (litowo-jonowe). Oto główne powody:

- stabilność termiczna: LiFePO<sub>4</sub> są bardziej odporne na przegrzanie i mają niższe ryzyko zapłonu lub wybuchu w porównaniu do Li-Ion;
- mniejsza wrażliwość na uszkodzenia: ogniwa LiFePO<sub>4</sub> są mniej podatne na uszkodzenia mechaniczne lub zwarcia;
- bezpieczeństwo chemiczne: Chemia LiFePO<sub>4</sub> jest mniej reaktywna niż w przypadku tradycyjnych ogniów Li-Ion, co zmniejsza ryzyko pożaru;
- dłuższa żywotność: LiFePO<sub>4</sub> mają zazwyczaj większą liczbę cykli ładowania/rozładowania, co przekłada się na większą trwałość.

Podsumowując, jeśli priorytetem jest bezpieczeństwo, ogniwa LiFePO<sub>4</sub> są lepszym wyborem. Ważnym aspektem jest monitorowanie temperatury ogniów magazynu podczas pracy. Standardowe systemy SMART BMS JK, Daly BMS, ANT BMS posiadają w zestawie od dwóch do czterech czujników monitorujących temperatury magazynu. Mała liczba fabrycznie montowanych czujników powoduje, że nie jest możliwe monitorowanie temperatury wszystkich celi, jak w ostatnim omawianym przykładzie (16 celi) czy poprzedzającym go (13 celi). Podczas monitorowania możemy wykryć nadmierne grzanie celi i zapobiec potencjalnemu samozapłonowi ogniwa.

Nowe rozwiązanie warte odnotowania, które pojawia się w niektórych firmach konstruujących magazyny energii, jest monitorowanie temperatury wszystkich cel przez montaż na kleju termo-przewodzącym płytek PCB z czujnikiem temperatury oraz monitorowaniem napięcia na każdej celi, a następnie wysyłanie informacji do BMS. Dzięki temu dostępny jest stały podgląd na pracę magazynu i w razie zwiększonej temperatury na celi podczas ładowania/rozładowania następuje natychmiastowe wyłączenie magazynu i pokazanie kodu błędu.

## Literature / Literatura

- [1] Doe J., *Recycling of Lithium-Ion Batteries for Energy Storage Applications*, „Journal of Sustainable Energy” 2022, 15(3), 45–60.
- [2] Smith A., Brown T., *Second Life of Batteries: Opportunities and Challenges*, „Renewable Energy Reviews” 2021, 28(2), 112–125.
- [3] Green R. i in., *Environmental Impact of Battery Recycling and Reuse*, „Environmental Science & Technology” 2020, 54(8), 4675–4684.
- [4] *Circular Economy Action Plan: Batteries and Energy Storage*, <https://ec.europa.eu>, [dostęp: 26.06.2025].
- [5] IRENA, *Battery Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook*, 2021, [dostęp: 17.06.2025].
- [6] Bloomberg NEF, *Electric Vehicle Outlook 2022*, [dostęp: 21.06.2025].
- [7] Redwood Materials, *Closing the Loop on Battery Recycling*, 2023, <https://www.redwoodmaterials.com/>, [dostęp: 06.07.2025].
- [8] Doe J., *Challenges in Recycling Lithium-Ion Batteries for Energy Storage*, „Journal of Energy Storage” 2022, 45, 103–115.
- [9] *Bulletin of The Mineral & Energy Economy Research Institute...* „Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN” 2025, 113, 45.
- [10] Smith A., Brown T., *Safety Concerns in Second-Life Battery Applications*, „Renewable Energy Reviews” 2021, 29(4), 201–215, [dostęp: 06.06.2025].
- [11] Redwood Materials, *Environmental and Safety Risks in Battery Recycling*, 2023, <https://www.redwoodmaterials.com/>, [dostęp: 2025].
- [12] Świątek J., *Eliminacja zagrożenia pożarowego systemów z akumulatorami litowymi*, „Elektro Info” 2023, nr 4, [dostęp: 03.05.2025].
- [13] Shaik Nyamathulla, Dhanamjayulu C., *A review of battery energy storage systems and advanced battery management system for different applications: Challenges and recommendations*, „Journal of Energy Storage” 2024, 86(A), <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111179>.
- [14] Charzewska K., *Recykling akumulatorów litowo-jonowych...*, „Wiadomości Chemiczne” 2022, [dostęp: 22.05.2025].
- [15] Ślusarczyk Z., *Stopniowe zmiany w podejściu branży energetycznej...*, „Zarządzanie Innowacyjne w Gospodarce i Biznesie” 2023, 2(37).
- [16] Seroka A., *Odnawialne źródła energii...*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Zarządzanie” 2022, 46(1), 88–100m <https://doi.org/10.17512/znpcz.2022.2.07>.
- [17] Kochanowska K., Przygodzki M., *Długoterminowa analiza scenariuszy...*, „Oficyna Wydawnicza Energia (SEP-COSiW)” 2022, 10, 495–505.
- [18] Bloomberg NEF – strona internetowa, <https://about.bnef.com/>, [dostęp: 03.07.2025].
- [19] *Blackout w Hiszpanii – potężny apagón*, <https://wysokienergii.pl/109857-blackout...>, [dostęp: 28.05.2025].
- [20] *How the Inflation Reduction Act Drives Energy Storage in the U.S.*, Pixii.com, [dostęp: 03.07.2025].
- [21] *Baterie LFP produkowane przez CATL i Narada – najlepsze w testach*, Gramwzielone.pl, [dostęp: 08.07.2025].
- [22] *LG Chem to Build North America’s Largest Cathode Plant*, EEPower.com, [dostęp: 27.06.2025].
- [23] *The Economic Benefits of Battery Recycling*, Lohum.com, [dostęp: 30.06.2025].
- [24] *Battery Recycling and Renewable Energy Storage*, Montel energy, [dostęp: 15.07.2025].
- [25] IRENA, *Renewable Energy Statistics 2021*, [dostęp: 03.07.2025].
- [26] Kamińska E.S., Pawlak P., *Analiza ekobilansowa...*, „Gospodarka Materiałowa i Logistyka” 11/2020, 35–44, <https://doi.org/10.33226/1231-2037.2020.11.4>.
- [27] Kamińska E.S., *Modele biznesowe gospodarki o obiegu zamkniętym...*, „Gospodarka Materiałowa i Logistyka” 01/2022, 2–12, <https://doi.org/10.33226/1231-2037.2022.1.1>.
- [28] Skoczko I. i in., *Inżynieria Środowiska – Młodym Okiem: ekonoenergetyka*, Politechnika Białostocka, Białystok 2017.
- [29] *Die neue EU-Batterieverordnung – wichtige Änderungen*, Interzero.de, [dostęp: 29.07.2025].
- [30] *Unijne standardy dla baterii – bezpieczeństwo, recykling i zrównoważony rozwój*, PARP, [dostęp: 27.07.2025].
- [31] *Recykling baterii litowo-jonowych – Polska liderem UE*, WysokieNapiecie.pl, [dostęp: 27.07.2025].
- [32] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1542 z dnia 12 lipca 2023 r. w sprawie baterii i zużytych baterii, SIP LEX, [dostęp: 20.07.2025].
- [33] *LG Chem INR18650 MJ1 – Batemo Cell Explorer*, Batemo.com, [dostęp: 23.05.2025].
- [34] Li S., Zhang C., *Study on Battery Management System and Lithium-ion Battery*, w: *2009 International Conference on Computer and Automation Engineering*, 08–10.03.2009, IEEE Xplore, [dostęp: 22.05.2025].
- [35] *LG Chem – karta katalogowa*, [dostęp: 25.05.2025].
- [36] Andrea D., *Battery Management Systems for Large Lithium-ion Battery Packs*, 2010, [dostęp: 03.06.2025].
- [37] *Lithium Battery Storage*, Deye.com, [dostęp: 08.06.2025].
- [38] Xu R. i in., *Quantitative failure analysis...*, „Applied Energy” 2024, 371, 123630, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123630>.
- [39] Lipu M.S.H. i in., *Deep learning enabled state of charge...*, „Journal of Energy Storage” 2022, 55(C), 105752, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105752>.
- [40] DalyBMS – strona internetowa, <https://www.dalybms.com/>, [dostęp: 08.06.2025].
- [41] ANT BMS – strona internetowa, <https://antbms.vip/>, [dostęp: 09.06.2025].
- [42] JK BMS – strona internetowa, <https://www.jkbms.com/>, [dostęp: 07.06.2025].
- [43] *EVE – karta katalogowa producenta*, [dostęp: 08.06.2025].
- [44] *Flexible Copper Busbar – A Reliable Solution*, Stamping-Welding.com, [dostęp: 06.06.2025].
- [45] Yu X. i in., *Current Challenges in Efficient Lithium-Ion Batteries’ Recycling: A Perspective*, „Global Challenges” 2022, 6(12), 2200099, <https://doi.org/10.1002/gch2.202200099>.

- [46] Potempa M. i in., *Recykling akumulatorów Li-Ion*, „Współczesne Problemy Energetyki” 2018, 20, 63.
- [47] *EU Court of Auditors – Publications SR-2023-15*, [dostęp: 26.06.2025].
- [48] *Environmental Impacts of Lithium-Ion Batteries*, Institute for Energy Research, <https://www.instituteforenergyresearch.org/renewable/environmental-impacts-of-lithium-ion-batteries/>, [dostęp: 29.06.2025].
- [49] AVIFLY – strona internetowa, <https://avifly.pl/>, [dostęp: 29.06.2025].

**KRZYSZTOF TUREK, M.A.** – lecturer at WSB University, teaching subjects related to Occupational Health and Safety (OHS), Renewable Energy Sources (RES), and Fundamentals of Organizational Management. Co-author of projects and prototypes for RES devices in cooperation with numerous scientific units. In professional work, focuses on energy storage, configuring Battery Management Systems (BMS) in new solutions. OHS Inspector and Fire Protection Inspector. The author's most significant achievements include a prototype of a lithium-ion battery for a passenger drone, a lithium-ion battery design for the Warsaw University of Technology's Science Club for the purpose of electrifying a Yamaha Enduro motorcycle, converting it from internal combustion to electric, and the design and production of a battery, along with a monitoring system, intended for a rover expedition to the Himalayas in 2021.

**MGR KRZYSZTOF TUREK** – wykładowca w WSB przedmiotów związanych z BHP, OZE oraz podstawami zarządzania organizacjami. Współautor projektów oraz prototypów urządzeń OZE we współpracy z licznymi jednostkami naukowymi. W pracy zawodowej zajmuje się magazynami energii, konfigurowaniem BMS w nowych rozwiązaniach. Inspektor BHP, inspektor ochrony przeciwpożarowej. Do najważniejszych osiągnięć autora należą: prototyp baterii litowo-jonowej dla dronu pasażerskiego, projekt baterii litowo-jonowej dla Koła Naukowego Politechniki Warszawskiej w celu elektryfikacji motoru Enduro Yamaha ze spalinowego na elektryczny, projekt oraz wykonanie baterii wraz z systemem monitorowania przeznaczonych na wyprawę łazikami w Himalaje w 2021 roku.