

# UZORCI NASTANKA EKSPLOZIJA U SKLADIŠTIMA BATERIJA

---

**Prskalo, Marija**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac  
University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:858822>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-31**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied  
Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel sigurnosti i zaštite

Stručni diplomski studij sigurnosti i zaštite

Marija Prskalo

# **UZORCI NASTANKA EKSPLOZIJA U SKLADIŠTIMA BATERIJA**

DIPLOMSKI RAD

Karlovac, 2023.

Karlovac University of Applied Sciences  
Safety and Protection Department

Professional graduate study of Safety and Protection

Marija Prskalo

# **PATTERNS OF EXPLOSIONS IN BATTERY STORAGE**

Final paper

Karlovac, 2023

Veleučilište u Karlovcu  
Odjel sigurnosti i zaštite

Stručni diplomski studij sigurnosti i zaštite

Marija Prskalo

# **UZORCI NASTANKA EKSPLOZIJA U SKLADIŠTIMA BATERIJA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:  
Jakšić Lidija, mag.ing.cheming., pred.

Karlovac, 2023.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

## **VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**

Stručni prijediplomski/ stručni diplomski studij: Sigurnosti i zaštite

Usmjerenje: Zaštita od požara

Karlovac, rujan 2023.

### **ZADATAK DIPLOMSKOG RADA**

Student: Marija Prskalo

Matični broj: 0420418022

Naslov: UZORCI NASTANKA EKSPLOZIJA U SKLADIŠTIMA BATERIJA

Opis zadatka:

U radu će biti prikazana primjena mjera zaštite na radu i zaštite od požara u skladištima baterija te analiza pojava eksplozija u skladištima baterija. Na temelju konkretnih događaja eksplozija u skladištima baterija bit će prikazan zaključak kako provesti pravilnu zaštitu skladišta, osmisliti plan požarnih jedinica te spriječiti daljnje širenje požara.

Zadatak zadan:

Travanj 2023.

Rok predaje rada:  
obrane:

Rujan 2023.

Predviđeni datum

Listopad 2023.

Mentor:  
Jakšić Lidija, mag.ing.cheming., pred.

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## **PREDGOVOR**

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno služeći se stečenim znanjem i navedenom literaturom.*

*Ovom prilikom bih se htjela zahvaliti svojim roditeljima i obitelji uz obećanje da slijedeći fakultet koji (ako) upišem neće morati ovako dugo čekati za završetak istoga.*

*Posebno bih se htjela zahvaliti svojoj mentorici Lidiji Jakšić, mag. ing. cheming, pred. na strpljenju, stručnim savjetima i cjelokupnoj pomoći prilikom pisanja diplomskog rada. Hvala svim nastavnicima, asistentima i kolegama Veleučilišta u Karlovcu, Odjela sigurnosti i zaštite na svim lijepim trenucima te pomoći prenesenom znanju tijekom studiranja.*

*Još jednom veliko hvala na stečenom znanju i ukazanom povjerenju tijekom studiranja.*

*Marija Prskalo*

## SAŽETAK

Danas su baterije jedan od najkorisnijih sustava u modernoj tehnologiji. Baterija je omogućila mnoge moderne elektroničke proizvode. Istraživanja temeljena na skladištima je relativno zrelo, ovisno o njihovoj primjeni, ali još uvijek nedostaju istraživanja o opasnosti od požara i mjerama zaštite od požara skladišta baterija (litij-ionskih baterija) i skladišta drugih industrijskih opasnih roba, koja se brzo razvijaju posljednjih godina. U ovom radu cilj je prikazati mjere zaštite na radu i opasnosti od požara u skladištima, kako osmisliti plan požarnih jedinica, spriječiti daljnje širenje i osigurati ljude i objekte. Na temelju stvarnih događaja, eksplozija u skladištima baterija donešeni su zaključci kako provesti pravilnu zaštitu skladišta.

*Ključne riječi:* baterije, litij-ionske baterije, skladište, eksplozija

## SUMMARY

Today, batteries are one of the most useful things in modern technology. The battery has made many modern electronic products possible. Research based on warehouses is relatively mature, depending on their application, but there is still a lack of research on the fire hazard and fire protection measures of battery warehouses (lithium-ion batteries) and warehouses of other industrial hazardous goods, which are developing rapidly in recent years. In this work, the goal is to show occupational safety measures and fire hazards in warehouses, how to design a plan for fire units, prevent further spread and secure people and facilities. Based on real events, explosions in battery warehouses, conclusions were drawn on how to implement proper storage protection.

*Key words:* batteries, lithium-ion batteries, storage, explosion

## SADRŽAJ

ZADATAK DIPLOMSKOG RADA .....	I
PREDGOVOR .....	II
SAŽETAK .....	III
SUMMARY .....	III
SADRŽAJ .....	IV
1. UVOD .....	1
1.1. Predmet i cilj ovog rada.....	1
1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja .....	1
2. BATERIJE .....	2
2.1. Povijest baterija.....	3
2.2. Primarne baterije.....	4
2.3. Sekundarne baterije .....	5
2.3.1. Litij-ionska baterija.....	7
3. SKLADIŠTE BATERIJA.....	9
3.1. Skladište baterija za litij-ionske baterije.....	9
3.2. Alati za simulaciju LIB skladišta .....	11
3.2.1. FDS softver.....	11
3.3. Rad sa litij-ionskim baterijama .....	13
4. EKSPLOZIJA.....	16
4.1. Metode gašenja požara.....	18
4.1.1. Vermikulit.....	18
4.2. Mjere za sprječavanje toplinske eksplozije .....	20
5. PRIMJERI DOGAĐAJA EKSPLOZIJA.....	22
5.1. Eksplozije uzrokovane litij-ionskim baterijama .....	22
5.1.1. Eksplozije toplinskog odbjeglog plina .....	23
5.1.2. Incidenti s brzom eksplozijom.....	23
5.1.3. Eksplozije bljeska luka.....	24
5.2. Eksplozija u postrojenju APS (Arizona Public Service) McMicken Battery Energy Storage .....	25
5.2.1 Opis postrojenja.....	25
5.2.2. Tijek događaja prije i nakon eksplozije te uzorci eksplozije .....	26
5.2.3. Sistem zaštite od požara u postrojenju .....	29
5.2.4. Istražna procedura.....	32
5.2.5. Procjena štetnog utjecaja na okoliš .....	33
5.3. Negativan utjecaj litij-ionskih baterija na okoliš .....	34



6. SUSTAV ZAŠTITE NA RADU .....	35
6.1. Zakon o zaštiti na radu .....	35
6.2. Zakon o zaštiti od požara .....	36
6.2.1 Pravilnik o zaštiti od požara u skladištima .....	37
7. ZAKLJUČAK.....	40
8. LITERATURA .....	41
9. PRILOZI.....	44
9.1. Popis simbola.....	44
9.2. Popis slika.....	44
9.3. Popis tablica.....	45

# 1. UVOD

Zbog razvoja tehnologija i industrija, dolazi do suvremene proizvodnje, njezine dinamike i složenosti. Takva ubrzanost u razvoju procesa dovodi do opasnosti po zdravlje čovjeka i njegov tjelesni integritet. Svrha zaštite na radu je otkrivati i otklanjati opasnosti koje ugrožavaju život i zdravlje osoba na radu, radi očuvanja preostale radne sposobnosti. [1] Eksplozija je brza kemijska reakcija praćena praskom, gdje potom dolazi do oslobađanja velike količine energije, topline zbog naglog pada tlaka te ima razarajući učinak. Budući da je prvi sustav baterija razvijen prije 100 godina, sada koristimo baterije gotovo svaki dan i u svakoj situaciji. Eksplozije nastale u skladištu baterija najčešće su uzrokovane eksplozijom zapaljivog plina zbog plinova koji nastaju u toplinskim odvodima baterije i eksplozije električnog luka koje dovode do strukturalnog kvara električnih kućišta baterije. Svrha baterija je da skladište energiju (električnu energiju), a takav sustav mora biti stabilan, fleksibilan i pouzdan. [2]

## 1.1. Predmet i cilj ovog rada

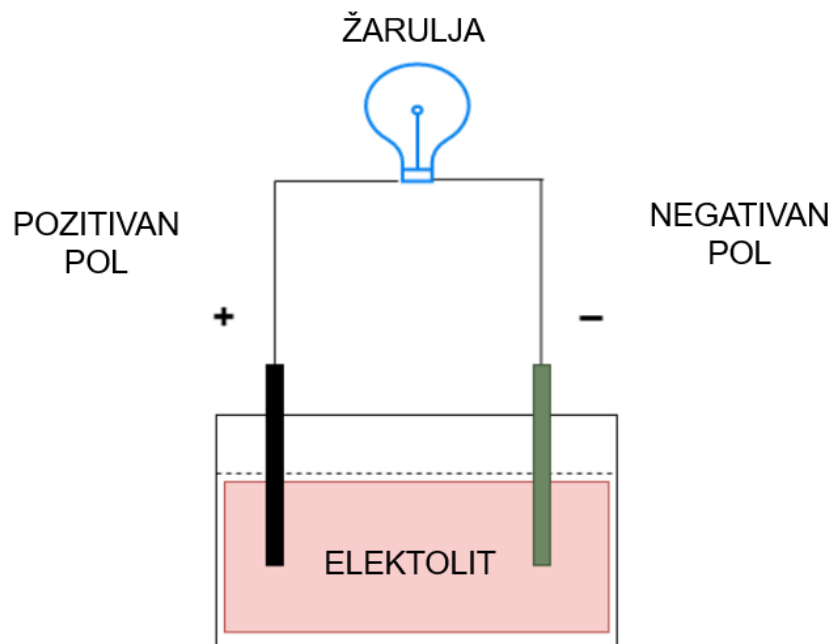
Cilj ovog rada je da se na temelju dostupne literature analizira pojava eksplozija u skladištima baterija, primjena mjera zaštite na radu u takvim situacijama te na temelju dobivenih podataka nakon procjene ugroženosti skladišta potrebno je odrediti mjere za sprečavanje nastanka i širenja požara. U radu su prikazani slučajevi eksplozija u skladištu baterija opisani u nekoliko primjera.

## 1.2. Izvori podataka i metode prikupljanja

U ovom radu korištena je stručna literatura te internetske stranice za analizu primjera slučajeva eksplozija u skladištima baterija te donošenje zaključaka na temelju sakupljenih pisanih i elektroničkih izvora, kao i vlastitih saznanja.

## 2. BATERIJE

Baterija je elektrokemijski uređaj koji može pohraniti energiju u obliku kemijske energije, a može biti i toplinska, sunčeva ili nuklearna energija. Kemijska energija se prevodi u električnu energiju kada je baterija spojena u strujni krug zbog protoka elektrona. Najpoznatije baterije su galvanska i akumulatorska baterija, termoelektrična baterija, sunčana ili fotoelektrična baterija, nuklearna, atomska ili izotopna baterija. Baterija se sastoji od tri elementa, a to su od negativne strane, pozitivne strane i elektrolita (kemikalija koja reagira s obje strane), kao što je prikazano na slici 1. Elektrolit se koristi kao medij za prijenos elektrona između anode i katode. Djelovanje baterije opisano je elektrokemijskim reakcijama zvanim oksidacija i redukcija. U ovoj reakciji, elektroni teku s jedne strane na drugu kada je vanjski krug spojen na anodu i katodu. [3] Sve baterije su uređaji koji daju električnu energiju iz kemijskog izvora energije. Izvor energije mora sadržavati dva reaktivna materijala koji su sposobni za spontanu oksidacijsko-redukcijsku reakciju. [4]



**Slika 1.** Jednostavni prikaz baterije [3]

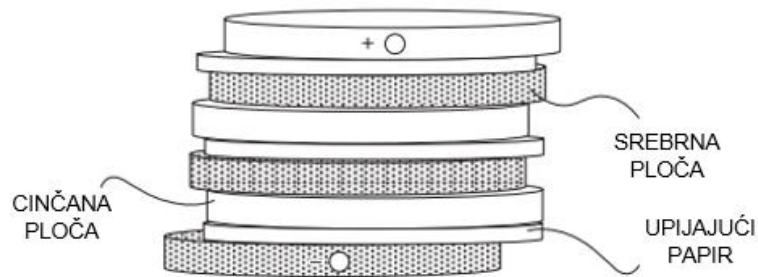
Baterija se koristi u primjenama gdje je potrebno pohraniti energiju za buduće potrebe. Prijenosni uređaji (prijenosno računalo, mobitel), uređaji za hitne slučajeve (pretvarači, svjetiljke) i uređaji male snage (satovi, oksimetri) uglavnom koriste baterije. Na temelju

funkcionalnosti, na tržištu su dostupne dvije vrste baterija – primarne baterije i sekundarne baterije. [3] Neke baterije mogu se puniti i koristiti više puta, dok se druge baterije mogu isprazniti samo jednom. Ako je baterija dizajnirana da se isprazni samo jednom i zatim baci, naziva se primarna baterija. Sekundarna baterija je punjiva. [4] No prije detaljnog opisa primarnih i sekundarnih baterija, potrebno je znati kako je baterija nastala, odnosno povijest izuma. Dizajni baterija razlikuju se ovisno o namjeni primjene ili mehaničkim i električnim aspektima. Potrebne konstrukcije ćelija mogu biti cilindrične, prizmatične vrste ili gumbaste ćelije. Termodinamika, kinetika i masa kao prijenosni učinci odredit će optimalne veličine stranica i izbora materijala. [5]

## 2.1. Povijest baterija

Kasnih 1700-ih i ranih 1800-ih godina započela je osnova elektrokemijskog skladištenja energije. Izraz „baterija“ (engl. *battery*) izvorno se koristio za sklopove topova u topničkim jedinicama, ali još 1749. godine Benjamin Franklin ga je upotrijebio, po prvi put, da bi opisao spajanje skupa staklenih kondenzatora obloženih metalom sa svake strane u svojim pokusima s električnom strujom. Misteriozne posude od prije više od 2000 godina bile su pronađene u Mezopotamiji, za koje je arheolog Koenig sugerirao da bi mogle djelovati poput galvanskih ćelija koje se sastoje od bakrenih i željeznih cijevi u kiselim voćnim sokovima. [5,6] Oko 1936. godine arheolozi su pronašli zdjele od terakote (skupni naziv za različite predmete izrađene od lončarske gline pečene na visokoj temperaturi i bez glazure, najčešće crvenkaste boje) koje su na sebi imale zarolanu pločicu bakra u selu blizu Bagdada. Znanstvenici pretpostavljaju da je to bila prva galvanska ćelija, te ju nazivaju „bagdadskom baterijom“. Ako se zaista radilo o bateriji, pretpostavlja se da se koristila za elektroforezu nakita, ili za proizvodnju manjih elektrošokova, u svrhu religijskog iskustva. [6,7] 1780-ih godina istraživali su tu pojavu Luigi Galvani i Alessandro Volta, te je Volta 1800. godine izumio prvu pravu bateriju. Njegova baterija osiguravala je stabilnu energiju, kada nije bila u upotrebi nije puno trošila, a nedostaci su bili curenje elektrolita i kratak životni vijek. 1859. godine nastala je prva punjiva baterija koju je izumio Gaston Planté. Kasnijih godina se i dalje razvijaju istraživanja baterija što dovodi do 1990-ih godina kada se u baterijama pojavio litij, a to je metal s najmanjom gustoćom i s najvećim elektrokemijskim potencijalom. 1996. godine u prodaji se pojavila prva litij-polimer baterija, koja se danas upotrebljava u manjim uređajima kao što su mobiteli, jer je fleksibilna i kompaktna. [6]

Na slici 2. prikazan je prvi baterijski sustav, voltažni stup, koji sadrži naizmjenično srebrne (ili bakrene) i cinčane ploče odvojene upijajućim papirom natopljen slanom otopinom (elektrolit) kako bi se povećala vodljivost elektrolita. [8]



**Slika 2.** Prvi baterijski sustav [8]

Otkriće elektrokemijskih ćelija pokazalo se od iznimne važnosti za industrijsko korištenje električne struje. Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća javlja se širok raspon baterijskih sustava koji se razvija i komercijalizira. Kako napreduju baterijske tehnologije, tako napreduje i njihovo korištenje. Baterijski sustavi danas su dio naše svakodnevice i koriste se u širokom rasponu primjena kao što su pokretanje, rasvjeta, prijenosni elektronični uređaji, svemirske letjelice, električna vozila i tako dalje. [8]

## 2.2. Primarne baterije

Baterije koje su napravljene samo za jednokratnu upotrebu i ne mogu se puniti, nazivaju se primarnim baterijama. Ova vrsta baterije se nakon upotrebe baca. To je vrlo jednostavan i praktičan izvor energije za prijenosne uređaje poput sata, kamere, svjetiljke i drugo. [3] Primarne baterije nalaze se u mnogim uobičajenim potrošačkim proizvodima poput otvarača garažnih vrata s daljinskim upravljanjem, daljinske brave za automobilska vrata, kućni detektori dima i daljinski upravljači za potrošačke elektroničke proizvode poput televizora i stereo uređaja. [4] Baterije dolaze u standardnoj veličini, prikazane na slici 3. [3]



**Slika 3.** Standardne veličine primarnih baterija [2]

Elektrokemijska energija proizvedena razgradnjom materijala elektrode i elektrolita će se smanjiti kada se ta elektroda ili elektroliti razgrađuju. Budući da je ovaj postupak nepovratan (ireverzibilna reakcija), bateriju treba zamijeniti novom baterijom. U tablici 1. su navedeni neki od uobičajenih sustava primarnih baterija. Međutim, takvi sustavi su skupi i ekološki nepovoljni zbog svog karaktera za jednokratnu upotrebu. [8] Iz navedenih razloga, nekada je potrebno takve baterije zakonski (ekološki) ili iz razloga uštede materijala, kemijski preraditi. [5]

**Tablica 1.** Prikaz najčešćih sustava primarnih baterija [8]

Baterijski sustav	Reakcija	Potencijal
Leclanchéov članak	$Zn + 2MnO_2 + 2NH_4Cl \rightarrow ZnNH_3Cl_2 + Mn_2O_3$	1,5
Mangan alkalna	$Zn + 2MnO_2 + 2H_2O \rightarrow ZnO + Mn_2O_3$	1,5
Srebro oksid/cink	$Zn + Ag_2O + H_2O \rightarrow Zn(OH)_2 + 2Ag$	1,6
Cink/zrak	$2Zn + O_2 \rightarrow 2ZnO$	1,45
Litij/magnezijev oksid	$Li + Mn_4O_2 \rightarrow Mn_3O_2 + (Li^+)$	3,5
Tionil klorid	$4Li + 2SOCl_2 \rightarrow 4LiCl + S + SO_2$	3,9

### 2.3. Sekundarne baterije

Baterije koje se punjenjem izrađuju za višekratnu upotrebu nazivaju se sekundarne baterije. Također se nazivaju i punjive baterije. Imaju istu elektrokemijsku reakciju kao i alkalne baterije, ali elektrokemijska reakcija može biti obrnuta. Ova vrsta baterije koristi se za prijenosne uređaje poput mobilnih telefona, prijenosnih računala, električnih vozila i drugo. Također, punjiva baterija se koristi s inverterom koji

pohranjuje energiju za napajanje naših kućanskih uređaja. [3] Na slici 4. prikazan je primjer sekundarnih baterija.



**Slika 4.** Prikaz sekundarnih baterija [9]

Tijekom zadnjih nekoliko godina suočavajući se s vremenom energetske krize i zaštite okoliša, načini skladištenja energetski učinkovitih i u velikim količinama s reverzibilnim sustavima potaknulo je područje tehnologije baterija. Sekundarne baterije predstavljaju takav reverzibilni sustav jer ih nije potrebno mijenjati nakon svakog pražnjenja ciklusa, već zahvaljujući reverzibilnoj prirodi elektrokemijskog naboja i pražnjenja sustava moguće ih je ponovo koristiti. Takve razvijene baterije su prikazane u tablici 2. Osim što su ekološki učinkovite i jeftine su, no imaju određeni životni vijek i moraju se zamijeniti nakon određenog ciklusa punjenja i pražnjenja. Nedostatak im je i u pogledu skladištenja energije velikih razmjera. [8]

Osnovna jedinica sekundarne baterije je elektrokemijska ćelija, koja se sastoji od negativne elektrode i pozitivne elektrode obično odvojene poroznim polimernim materijalom impregniranim ionskim vodičem koji se naziva elektrolit. Time se sprječava kontakt anode s katodom. Elektroni nastaju elektrokemijskom oksidacijom,  $A \rightarrow A^{z+} + ze^{-}$ , tijekom pražnjenja na negativnoj elektrodi (anoda) gdje putuju u vanjski krug i čine koristan rad i zatim se uvode kroz elektrolit i to nazivamo elektrokemijskom redukcijom,  $C + ze^{-} \rightarrow C^{z-}$ , na pozitivnoj elektrodi (katodi) kao pozitivni i negativni ioni. Anioni  $C^{z-}$  kreću se u elektrolitu i nose struju od pozitivne elektrode natrag do negativne elektrode (anoda) za kraj električnog kruga, dok kationi  $A^{z+}$  prelaze na pozitivnu elektrodu (katoda). [10]

**Tablica 2.** Prikaz najčešćih sustava sekundarnih baterija [8]

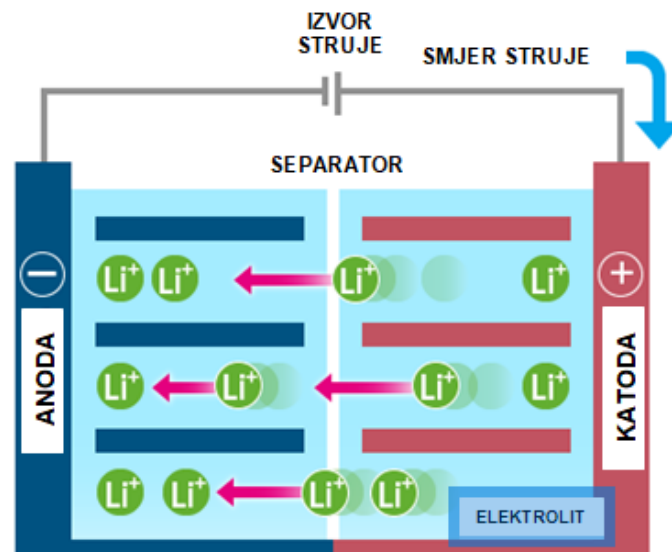
Baterijski sustav	Reakcija	Potencijal
Olovno kiselinski	$\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	2
Nikal kadmijev	$\text{Cd} + 2\text{NiOOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Ni(OH)}_2 + \text{Cd(OH)}_2$	1,3
Nikal metal hidridna	$\text{H}_2 + 2\text{NiOOH} \rightarrow 2\text{Ni(OH)}_2$	1,3
Litij ionska	$\text{Li}_x\text{C}_6 + \text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{C}_6 + \text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$	3,6

### 2.3.1. Litij-ionska baterija

Iako su primarne baterije bile dominantne do 1970-ih godina, sekundarne baterije (olovo-kiselina i nikal-kadmij) s vremenom su zauzeli njihovo mjesto. Nikal-kadmij, tipična sekundarna baterija male veličine, no međutim ima nekoliko nedostataka kao što su izvor napajanja, niska gustoća energije i ekološki problemi. Sony Corporation započeo je s proizvodnjom baterija sredinom 1970-ih godina. Njihovi glavni proizvodi, baterije u to doba bile su primarne (srebrov oksid, ugljik cink, alkal manganske i primarne litijeve ćelije). Kako bi se Sonyjevo poslovanje s baterijama prilagodilo trendu, razvoj novih punjivih ćelija bio je prijeko potreban. Sony je započeo razvoj sekundarnih baterija 1985. godine. Sony je počeo istraživati mogućnost ćelija s anodama na bazi litija, i po prvi put uspio u razvoju litij-ionske sekundarne baterije 1991. godine. [11] Litij-ionske baterije (LIB) imaju najveću gustoću energije među praktičnim sekundarnim baterijama i naširoko se koriste u elektronici, električnim vozilima, pa čak i u stacionarnim sustavima za pohranu energije. Zajedno sa širenjem njihove potražnje i primjene, raste zabrinutost za resurse litija i kobalta. [12] U usporedbi s tradicionalnim baterijama, LIB predstavljaju dobru kvalitetu i upotrebu na mnogim poljima zbog svog visokog radnog napona, niskih učinaka memorije i visoke gustoće energije, odnosno imaju dugi životni vijek i bolju učinkovitost. Dok su im nedostatci nestabilnost i toplinski bijeg. [13] Ekonomski stručnjaci predviđaju da će se veličina globalnog tržišta LIB-a više nego udvostručiti sa 44,2 milijarde USD u 2020. godine na 94,4 milijarde USD do 2025. godine. [14] Rad LIB-a je tako što se litijevi ioni kreću kroz elektrolit između pozitivne (katoda) i negativne (anoda) elektrode. Kada se baterija puni, struja se šalje od punjača do baterije što uzrokuje kretanje litijevih iona od katode do anode kroz elektrolit. Ovaj proces je obrnut kada se baterija prazni, a litijevi ioni pohranjeni unutar anode zatim se kreću kroz elektrolit do katode. Iako zbog vrlo inovativnog dizajna, LIB nisu bez sigurnosnih problema. Poznato je da se ova vrsta baterije pregrije, topi, zapali



i eksplodira pod određenim uvjetima. Do takvih situacija dolazi kada je stabilnost baterije dovedena u opasnost. [15] Na slici 5. prikazan je shematski prikaz rada LIB-a.



**Slika 5.** Prikaz rada litij-ionske baterije [16]

Anoda za litij-ionske ćelije je spoj ugljika, s grafitnom katodom litijeva oksida. Litijске baterije koje koriste metalni litij imaju sigurnosne nedostatke kada se koriste kao sekundarni (punjivi) izvori energije. Iz tog razloga koriste se spojevi litija umjesto metalnog litija. Katode se sastoje od slojevitog kristala (grafita) u kojem se nalazi litij interkalirani. Neki od metalnih oksida litija su  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{NiNi}_{0,3}\text{Co}_{0,7}\text{O}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$ ,  $\text{LiV}_2\text{O}_5$ ,  $\text{LiV}_6\text{O}_{13}$ ,  $\text{LiMn}_4\text{O}_9$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  i  $\text{LiNiO}_{0,2}\text{CoO}_2$ . Elektroliti su obično  $\text{LiPF}_6$ , iako to ima problem s korozijom aluminija, pa se traže alternative. Jedna takva mogućnost je  $\text{LiBF}_4$ . Elektrolit u baterijama je tekući i koristi organsko otapalo. Membrane su neophodne za odvajanje elektrona od iona. Baterije koje su trenutno u širokoj upotrebi imaju mikroporozne polietilenske membrane. Interkalacija je dugo proučavan proces koji je konačno pronašao praktičnu upotrebu. Dugo je poznato da mali ioni (poput litija, natrija i drugih alkalijskih metala) mogu stati u međuprostore u kristalu grafita. I ne samo to, ti metalni atomi mogu ići dalje i omogućiti da se grafitne ravnine razdvoje kako bi pristajala dva, tri ili više slojeva metalnih atoma između karbonskih ploča. Može se zamisliti kako je ovo sjajan način skladištenja litija u bateriji. Grafit je vodljiv, razrjeđuje litij radi sigurnosti, relativno je jeftin i ne dopušta dendrite ili druge neželjene kristalne strukture za formiranje. [17]

### 3. SKLADIŠTE BATERIJA

#### 3.1. Skladište baterija za litij-ionske baterije

U normalnoj uporabi, LIB su stabilne i rade kako treba bez problema. Ali ako se jedna baterija zapali, rezultati mogu biti katastrofalni. Unutar LIB-a nalazi se računalni čip koji se koristi za kontrolu razine napunjenosti. Pod određenim okolnostima, primjerice ako je baterija oštećena padom ili probijanjem uređaja, kemijska reakcija unutar baterije može uzrokovati kratki spoj. To može prouzročiti jako brzo pregrijavanje baterije i njezin "toplinski bijeg", što zatim može dovesti do požara. [14]

Požari LIB-a vrlo su opasni i teško ih je riješiti jer oslobađaju zapaljive i otrovne pare koje potpomažu stvaranju vatre. Izvješće koje je izradilo „Udruženje za zaštitu okoliša“ u Ujedinjenom Kraljevstvu pokazalo je da oko 48 % požara u reciklažnim dvorištima svake godine uzrokuju LIB. Rast upotrebe LIB-a također donosi povećane rizike za tvrtke koje ih skladište i distribuiraju takve proizvode. Stoga je i mnogo više proizvoda koji se skladište i isporučuju kupcima cestom, željeznicom, zrakom ili morem koji sadrže LIB, čak više nego ikad prije. [14]

Zbog svoje nestabilnosti i toplinskog bijega, LIB je uvijek bila izložena ozbiljnom riziku u procesu transporta i skladištenja. Zbog toga provode se istraživanja o riziku takvog termičkog bijega u skladištima baterija, iako ih je trenutno jako malo. Često se u takvim skladištima koristi softver za dinamiku požara (engl. *fire dynamics software* - FDS) koji koristi numeričku simulaciju različitih požarnih uvjeta u LIB skladištu i omogućava određivanje optimalnog stanja napunjenosti baterije (engl. *state of charge* - SOC), razmaka među policama i sheme rasporeda protupožarnih objekata u skladištu. Rezultati pokazuju da kada se baterije od 50 % i 100 % SOC-a skladište u skladištu, rizik od toplinskog širenja vatre i difuzije dima mnogo je veći nego u uvjetima 0 % SOC-a. Rezultati također pokazuju da automatski sustav za raspršivanje vode za gašenje požara ima evidentan inhibicijski učinak na požar u skladištu LIB-a, te je u uvjetima 100 % SOC-a potrebno ugraditi automatski raspršivač vode s brzoreagirajućim sprinklerom (uređaj za gašenje požara). Razmak polica u skladištu također je važan faktor koji utječe na širenje požara u skladištu. Stoga je za sprječavanje širenja požara definirana kritična vrijednost razmaka polica u različitim uvjetima rada, odnosno kada nema automatskog sustava za prskanje vode u uvjetima 100 % SOC-a, kritična

vrijednost razmaka polica je 8.3 m, što nije ekonomski praktično. Stoga, kada se u skladištu pohranjuju LIB sa srednjim i visokim SOC vrijednostima, treba postaviti automatski sustav za prskanje vode kako bi se smanjila kritična vrijednost razmaka na policama. [13]

Nesreće koje su se dogodile imale su ogromne ekonomske gubitke, pa čak i unesrećene osobe. Glavni uzroci ovih nesreća su kratki spoj, samozagrijavanje i starenje. Prema tome, za učinkovito sprječavanje takvih nesreća, potrebno je modelirati širenje toplinske struje u LIB skladištu kako bi se dizajnirale i implementirale strategije prevencije i kontrole temeljene na riziku. [13]

Kako bi se znalo postupati prema LIB baterijama ili općenito baterijama pri transportu i skladištenju te kako bi se mogle izbjeći nesreće, eksplozije ili požari, potrebno je provesti eksperimentalna istraživanja. Neka od provedenih istraživanja su:

- a) u jednom istraživanju proučavali su ponašanje pri izgaranju 50 Ah  $\text{LiFePO}_4$ /grafitne baterije koja se koristi za električna vozila, te su dobiveni površinska temperatura, ponašanje pri izgaranju, brzina otpuštanja topline, temperatura plamena i stopa gubitka mase, što je dalo osnovna saznanja o ponašanju baterije kako bi se moglo adekvatno odrediti dizajn zaštite od požara;
- b) sljedeće istraživanje provedeno je u eksperimentalnom studiju gdje se oponašao požar LIB-a pod različitim rasporedima kao što su vodoravni i okomiti te su rezultati pokazali da baterije s većom površinom grijanja imaju rizičnije i žešće požare u usporedbi s ostalima;
- c) jedno od provedenih niza eksperimentalnih studija i matematičkih zaključaka kako bi se istražila ponašanja širenja toplinskih kvarova unutar dvije vrste ćelija pod različitim načinima grijanja i detaljno otkrili karakteristike širenja toplinskih kvarova i odgovarajuće mehanizme;
- d) uz proučavanje rasprostranjenosti toplinskog bježanja LIB-a u smislu rasporeda, brojne studije razmatrale su različite smjerove parametara baterije, kao što su ciklus starenja, snaga grijača, način povezivanja, raspored, razmak ćelija i stanje napunjenosti (SOC) na širenje toplinske struje baterija stoga su istraživači upotrijebili električni grijač iste veličine i oblika kao LIB kako bi pokrenuli događaj toplinskog bježanja;
- e) također je bilo istraživanja o obuzdavanju ponašanja propagacije LIB-a nakon toplinskog bijega, a uz ta istraživanja jedan od timova su predložili novu

strategiju kontrole pomoću vodene magle i pokazali mogućnost korištenja te strategije u stvarnim slučajevima kroz niz eksperimenata;

- f) trenutna istraživanja o širenju toplinske energije i kontroli LIB-a uglavnom se razmatralo na veličinama malog razmjera s nekoliko baterija ili jednog paketa baterija, ali požari velikih razmjera mogu biti uzrokovani u mnogim slučajevima kada je toplina LIB-a izvan kontrole, stoga je potrebno proučiti toplinsku promjenu velikih naslaganih baterija, kao što su LIB tvornice i skladišta. [13]

## **3.2. Alati za simulaciju LIB skladišta**

### **3.2.1. FDS softver**

Kako bi se riješili nedostaci postojećih istraživanja, odnosno donijeli zaključci za veću površinu, znanstvenici su odlučili provesti studiju koristeći CFD softver za simulaciju LIB skladišta. Neka od istraživanja koja su potpomogla takvom razvoju su:

- a) jedan tim istraživača proveo je numeričku simulaciju i eksperimentalno istraživanje ponašanja toplinskog odlaska cilindričnog LIB-a visoke gustoće energije sa 100 % SOC-a te je procijenjena mogućnost širenja topline bez puknuća na strani baterije;
- b) drugi tim istraživača je razvio numerički model spajanjem konjugiranog prijenosa topline i CFD-a kako bi simulirali razvoj temperature baterije i unutarnjeg tlaka od 18 650 LIB-a pod uvjetima zlouporabe topline, ispuha i naknadnog izgaranja;
- c) kombiniranjem softvera za višefizičku simulaciju polja COMSOL i CFD softver FDS za modeliranje LIB modula znanstvenici su predvidjeli ponašanje širenja toplinskog odbjeglog požara na susjedne baterije simulacijom razvoja temperature u bateriji;
- d) neke od studija su analizirale toplinski odlazak LIB-ova velike veličine i ovaj tim znanstvenika koristio je softver FDS za numeričku simulaciju toplinskog bijega LIB-ova električnih vozila na podzemnom parkiralištu te su njihovi rezultati dali smjernice i prijedloge za sigurnu evakuaciju osoblja i intervenciju vatrogasne postrojbe nakon požara u podzemnom parkiralištu;
- e) istraživači su koristili softver FDS za modeliranje električnog autobusa i simulirali proces difuzije toksičnog dima nakon toplinskog odlaska LIB-a tijekom rada električnog autobusa te ovaj rad namjerava koristiti numeričku

simulaciju za analizu ključnih varijabli zaštite od požara u LIB skladištu u Nanjingu, Kina, kao što su kao baterijski SOC, razmak između polica i automatski sustav za gašenje požara. [13]

Softver za dinamiku požara (engl. *Fire Dynamics Simulator* - FDS) model je računalne dinamike fluida (engl. *computational fluid dynamics* - CFD) protoka fluida izazvanog vatrom. Softver numerički rješava oblik *Navier-Stokesovih* jednadžbi prikladnih za strujanje male brzine, toplinski pokretane, s naglaskom na prijenos dima i topline iz požara. [18] To je besplatni softverski alat otvorenog koda koje nudi Nacionalni institut za standarde i tehnologiju (engl. *National Institute of Standards and Technology* - NIST) Ministarstva trgovine Sjedinjenih Država, omogućen za korištenje 2000. godine. Do danas je otprilike polovica primjena softverskog modela FDS bila za projektiranje sustava za upravljanje dimom i studije aktivacije sprinklera ili detektora. Drugu polovicu čine sanacije stambenih i industrijskih objekata od požara. Tijekom svog razvoja FDS je bio usmjeren na rješavanje praktičnih problema požara u inženjerstvu zaštite od požara, dok je u isto vrijeme pružao alat za proučavanje temeljne dinamike požara i izgaranja. FDS je program koji čita ulazne parametre iz tekstualne datoteke, izračunava numeričko rješenje vladajućih jednadžbi i zapisuje izlazne podatke koje odredi korisnik u datoteke. Na slici 6. prikazan je primjer datoteke FDS-a te vidljivosti plina u prostoriji. [19]

```

*job1.fds - Blocco note di Windows
File Modifica Formato Visualizza ?
&HEAD CHID='job1', TITLE='job1' /

&MESH XB=0, 3, 0, 4, 0, 3, IJK= 30, 40, 30 /
&TIME T_END=60. /

&VENT XB= 1, 2, 4, 4, 0, 2, SURF_ID='OPEN' / door
&VENT XB= 3, 3, 2, 3, 1, 2, SURF_ID='OPEN' / window

&REAC FUEL = 'PROPANE'
&OBST XB= 1, 2, 1.5, 2.5, 0, 0.5, COLOR='RED', SURF_ID='fire1' /
&SURF ID='fire1', HRRPUA=250 /

&DEVC ID='T air 1', XYZ=1, 2, 2.8, QUANTITY='TEMPERATURE' /
&SLCF PBY = 2, QUANTITY='TEMPERATURE' /

&TAIL /

```

a)



b)

**Slika 6.** a) prikazana je datoteka zadanog FDS-a, b) prikaz „smokeview-a“ u prostori u [19]

### 3.3. Rad sa litij-ionskim baterijama

Iako se ne može pokriti svaki aspekt upravljanja rizikom, cilj je u što većoj mjeri smanjiti negativan utjecaj, mjerama prevencije ili ga spriječiti, stoga je bitno podizanje svijesti o rizicima LIB-a u skladištima, a neke od mjera su:

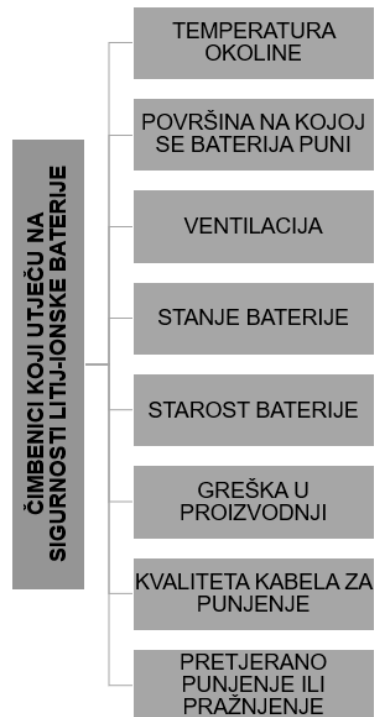
- unaprijed definirati plan hitnog odgovora za rješavanje problema s oštećenim ili pregrijanim LIB te o tome kako bi trebalo obučiti ključne zaposlenike prije nego što se baterije puste u skladište ili u upotrebu;
- unaprijed definirani plan kontrole opasnosti za upravljanje prijemom, skladištenjem, otpremom i nadzorom zapakiranih LIB-a, te o tome kako bi trebalo obučiti ključne zaposlenike prije nego što se baterije puste u skladište ili u upotrebu;

- slaganje LIB-a na pod trebalo bi biti strogo kontrolirano u određenim područjima s ograničenom visinom, otiscima stopala i udaljenosti jednih od drugih;
- skladištenje LIB-a u regalima ne bi trebalo biti dopušteno osim ako zgrada i regali nisu potpuno posuti čvrstim metalnim vodoravnim i okomitim barijerama između svakog skladišnog prostora;
- pri povratu proizvoda treba biti posebno oprezan jer bi uređaji koje kupci šalju natrag mogli stići oštećeni i često nisu zapakirani pa mogu pretrpjeti veći fizički kvar tijekom procesa povrata;
- infracrvene termografske preglede pomoću ručnog IC pištolja potrebno je obaviti na svakom paketu LIB-a po dolasku i prije otpreme;
- vizualne inspekcije oštećenja i infracrvene termografske inspekcije trebale bi se provoditi kako bi se pokrile sve LIB svaka 3 do 4 sata;
- svako odstupanje od uobičajeno očekivane opće temperature za 3 °C ili više na bilo kojem paketu pojedinačnih LIB-a treba odmah prijaviti upravi kako bi se mogla pokrenuti unaprijed definirana akcija hitnog odgovora;
- kao mjeru predostrožnosti, čeličnu kantu djelomično napunjenu vodom treba držati na otvorenom najmanje 3 m dalje od zgrade, spremnu za umetanje zapakiranih LIB-a s povišenom temperaturom pomoću viličara;
- drugi materijali za suzbijanje požara poput vermikulita ili pijeska mogu se koristiti za gašenje zahvaćene baterije te ove mjere možda neće zaustaviti nastavak kemijskog požara, čak ni pod vodom, ali će pomoći u obuzdavanju požara;
- pakete LIB-a stavljenih u takav spremnik zaposlenici trebaju ostaviti nedirnute i trebalo bi pozvati dobavljača baterija da riješi opasnost od baterije na licu mjesta i da je sigurno ukloni s mjesta radi daljnje procjene.

[14]

LIB su osjetljive na pretjeranu toplinu, pa ih treba koristiti, skladištiti i puniti u rasponu temperatura koje preporučuje proizvođač baterija. Nikada se ne smiju puniti LIB na mekoj ili zapaljivoj površini. Zbog velike osjetljivosti LIB-a na vlagu i toplinu, trebalo bi ih se skladištiti i puniti samo u dobro prozračenom prostoru. Stanje baterije je jako bitno, odnosno je li baterija oštećena ili natečena. Ako se primijeti takva oštećenja potrebno ih je sigurno zbrinuti. Poznato je i da stare baterije uzrokuju sigurnosne

opasnosti, pa ih također treba odbaciti ako pokazuju znakove kvara. Može doći i do greška u proizvodnji te prije upotrebe je potrebno provjeriti baterije. Kvaliteta kabela za punjenje je isto bitna i potrebno je puniti samo s originalnim kablom ili kablom izrađenim u skladu s nacionalnim sigurnosnim propisima. Treba izbjegavati prekomjerno punjenje ili pretjerano pražnjenje. Na slici 7. prikazani su čimbenici koji utječu na sigurnost LIB-a. [15]

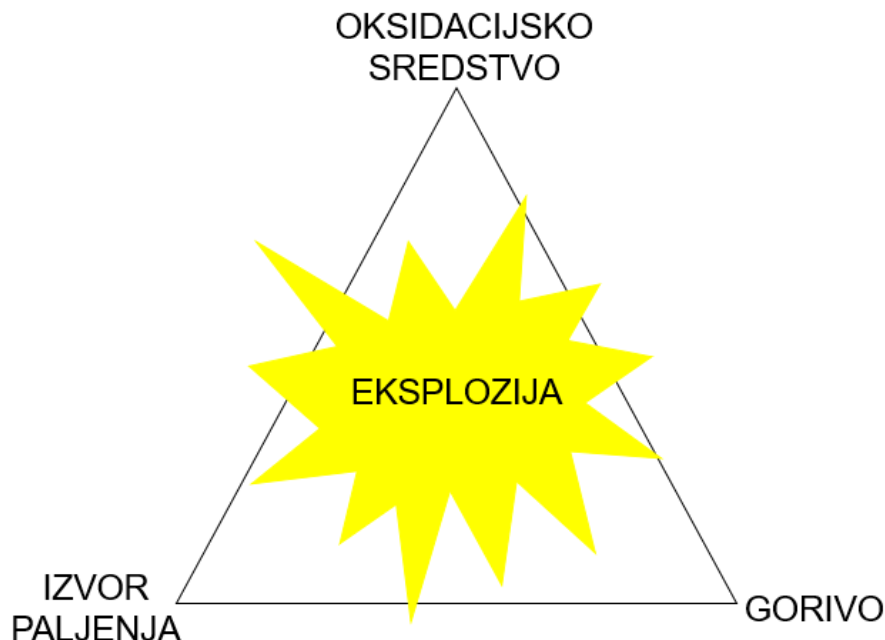


**Slika 7.** Čimbenici koji utječu na sigurnost litij-ionske baterije [15]



## 4. EKSPLOZIJA

Eksplodija se definira kao nagla oksidacija koja rezultira trenutnim povećanjem temperature, tlaka ili jednog i drugog istovremeno, a posljedica je brzog izgaranja plina koji se miješa sa zrakom. Visoka buka i tlačni valovi su učinci eksplozije što može dovesti do rušenja zidova i loma stakla. Do ekspanzije plina, odnosno eksplozije može doći zbog topline, dimnih oblaka, plamena ili nekog drugog smrtnog učinka. Do nastanka eksplozije dolazi kada se istovremeno postigne dovoljna koncentracija unutar granica eksplozivnosti, mješavina goriva (plin poput vodika), oksidacijskog sredstva (kisik iz zraka) i izvora paljenja (električna iskra), što je prikazano na slici 8. i prikazano trokutom eksplozije. [20]



**Slika 8.** Trokut eksplozije [20]

Eksplodivna atmosfera je naziv kada dođe do mješavine zapaljive tvari i kisika iz zraka te nastaje kada dođe do nekontroliranog istjecanja zapaljivog plina, pare ili tekućine. Kada je koncentracija tvari u mješavini unutar granica eksplozivnosti (između gornje i donje granice eksplozivnosti) uz prisustvo izvora paljenja dolazi do eksplozije. Donja granica eksplozivnosti je minimalna koncentracija zapaljive tvari i oksidacijskog sredstva (zraka) koja može izazvati eksploziju, dok je gornja granica eksplozivnosti maksimalna koncentracija zapaljive tvari i oksidacijskog sredstva (zraka) koja može izazvati eksploziju. Do eksplozivnosti dolazi unutar granica jer ako je koncentracija

manja od donje granice eksplozivnosti, do eksplozije ne može doći, a ako je iznad gornje granice eksplozivnosti, smjesa je prezasićena i ne dovodi do eksplozije. Temperatura i tlak utječu na eksplozivnost, odnosno na granice eksplozivnosti. Više temperature rezultiraju sniženjem donje i povišenjem gornje granice eksplozivnosti, dok visoki tlak dovodi do povećanja objiju vrijednosti. [20] Neki od mogućih izvora, i najčešćih prikazani su na slici 9.



**Slika 9.** Izvori paljenja [20]

## 4.1. Metode gašenja požara

### 4.1.1. Vermikulit

Dostupni su posebno dizajnirani aparati za gašenje požara LIB-a, temeljeni na materijalu koji se zove vermikulit. Također se može koristiti aparat za gašenje požara klase B (prah, pjena, CO<sub>2</sub>), iako postoji opasnost od ponovnog izbijanja požara.

Sredstvo za gašenje požara s vodenom vermikulitnom disperzijom nova je, revolucionarna tehnologija koja se koristi za učinkovitu borbu protiv požara LIB-a. S porastom tehnologije koja koristi LIB, dolazi i dodatni rizik od požara istih. Posljedice požara LIB-a su ozbiljne, stoga je ključno poduzeti odgovarajuće mjere opreza. Vodena vermikulitna disperzija je vodena disperzija kemijski ljuštenog vermikulita. Nanosi se na požare LIB-a kao magla, gasi ih i sprječava širenje požara.

Vermikulit, prikazan na slici 10., je naziv za skupinu hidratiziranih laminarnih aluminij-željezo-magnezij silikata. Sastoji se od tankih, ravnih pahuljica koje sadrže mikroskopske slojeve vode. Kemijsko ljuštenje vermikulita proizvodi mikroskopske pojedinačne pločice koje slobodno lebde u vodi. Ovo daje stabilnu vodenu disperziju vermikulita koja se koristi kao sredstvo za gašenje požara LIB-a. Vermikulit je prirodni mineral. Kemijski je i fizički inertan, ispušta paru samo kada je izložen povišenim temperaturama. Također je netoksičan za ljude, biljke i životinje. [21]



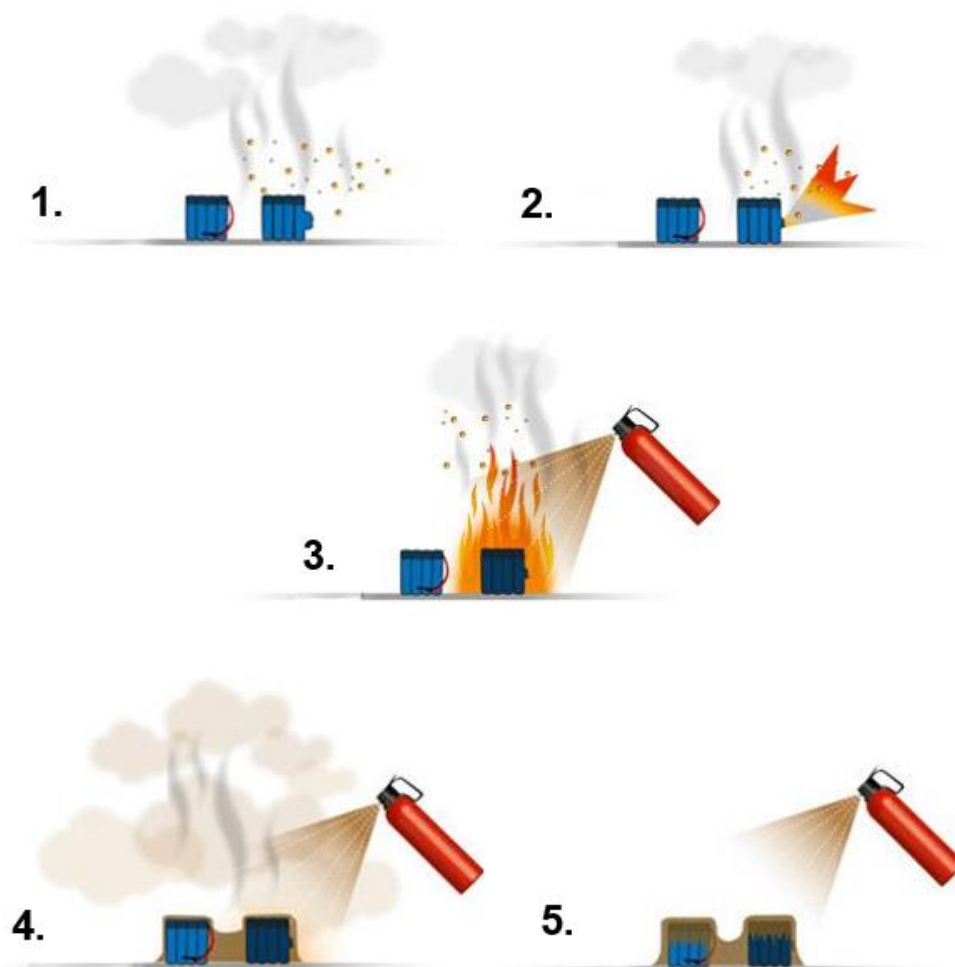
**Slika 10.** Vermikulit [22]

Kategoriziran po fazama, vermikulit se može podijeliti na neprošireni vermikulit i prošireni vermikulit. Kategoriziran po boji, može se podijeliti na zlatnu i srebrnu (bjelokost). Vermikulit ima odlična svojstva kao što su toplinska izolacija, otpornost na hladnoću, antibakterije, sprječavanje požara, apsorpcija vode i apsorpcija zvuka. Kada se peče 0,5 – 1,0 minuta ispod 800 – 1000 °C, njegov volumen može se brzo povećati za 8 do 15 puta, čak i do 30 puta, s tim da se boja promijeni u zlatnu ili srebrnu, čime se stvara rašireni vermikulit od labave teksture koji nije antikiselina i nije loš u električnim performansama. Vermikulit će nakon procesa ekspanzije poprimiti slojeviti pahuljasti oblik, s udjelom koji uglavnom iznosi 100 – 200 kg/m<sup>3</sup>. Zbog ogromne količine ekspanziranog vermikulita, troškovi transporta bili bi prilično veliki, tako da je izvezeni vermikulit obično vrste neproširen. [22]

Čestice vermikulita unutar maglice talože se na površini gorućeg goriva kako bi stvorile film na vrhu vatre. Film se trenutno suši, dok se čestice trombocita visokog omjera preklapaju i vežu zajedno, stvara se nezapaljiva kisikova barijera između goriva i atmosfere. Ovaj proces ima rashladni učinak na izvor goriva te kako sadržaj vode u vodenoj vermikulitnoj disperziji isparava, pločice vermikulita počinju se nakupljati i vatra se stavlja pod kontrolu.

Na slici 11. prikazan je proces gašenja požara LIB-a s vodenom vermikulitnom disperzijom, a proces je opisan u nastavku:

- kada su LIB izložene toplini, fizičkim oštećenjima ili udarcima te prekomjernom punjenju, prelaze u temperaturni bijeg;
- stanice su dovoljno nabubrene, oslobađajući vruće zapaljive plinove (ugljkovodike) koji nastaju disocijanjem elektrolita;
- ugljikovodici snažno gore na visokim temperaturama i brzo šire vatru na okolne ćelije i zapaljive materijale;
- vodena vermikulitna disperzija se nanosi kao fina maglica, koja trenutno hladi LIB i gasi plamen;
- vodena vermikulitna disperzija inkapsulira izvor goriva i izolira ćelije, sprječavajući daljnje širenje toplinske struje – stavljajući požar pod kontrolu. [21]



**Slika 11.** Prikaz gašenja požara vermikulitom [21]

#### **4.2. Mjere za sprječavanje toplinske eksplozije**

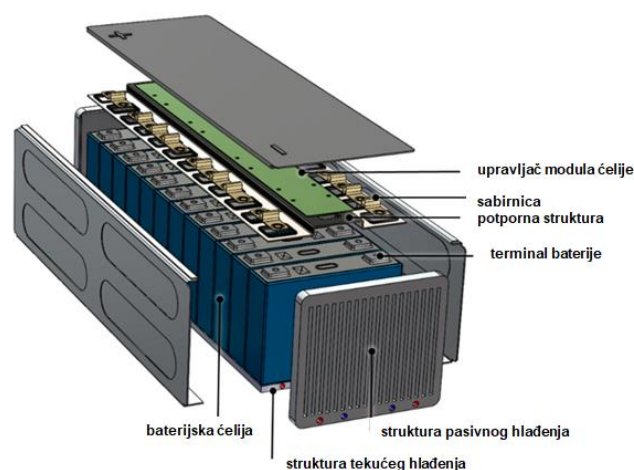
LIB za pohranu energije ima problem s toplinskim bijegom. Novi Korejski propisi usmjereni su na ograničavanje punjenja na manje od 90 % SOC kako bi se spriječilo stvaranje toplinske eksplozije. Novi standard NFPA 855 za sustave za pohranu energije zahtijeva da se mora osigurati uređaj ili druga odobrena metoda kako bi se spriječilo, otkrilo i minimizirao utjecaj toplinskog bijega. Još jedan zahtjev NFPA 855 za LIB sustave je kontrola eksplozije, specificirana kao sustavi za sprječavanje eksplozije u skladu s NFPA 69 ili deflagracijsko odzračivanje u skladu s NFPA 68. Postoji iznimka za sustave koji su imali opsežna ispitivanja požara koji pokazuju da zapaljive koncentracije plina u prostoriji, zgradi ili ulaznoj jedinici ne smiju prijeći 25 %

donje granice zapaljivosti na mjestima gdje je vjerojatno da će se plin akumulirati. Opsežna ispitivanja požara omogućila su pružanja informacija potrebne za projektiranje učinkovitih sustava za kontrolu eksplozije, odnosno svih skladišta sa sustavom baterijskog napajanja. Sustavi za pohranu energije baterija na otvorenom prostoru zahtijevaju evaluaciju ispitivanja zbog mogućeg nastanka toplinski odbjeglog požara. Potrebno je da ventilacija bude postavljena i usmjerena tako da udarni valovi i svi potencijalni plinovi su usmjereni prema gore i dalje od osoblja. Potrebno je ručno upravljati sustavom za pročišćavanje odvoda dima i plinova prekidačem.

## 5. PRIMJERI DOGAĐAJA EKSPLOZIJA

### 5.1. Eksplozije uzrokovane litij-ionskim baterijama

LIB služe za pohranu energije kapaciteta do megavatnih (MW) razina (Slika 12.). Mnoge takve baterije su u rasponu od 2 MW–20 MW, ali proizvode se čak i kapaciteta većih od 100 MW. Litij-ionske ćelije čine osnovni sastavni dio sustava, ugrađenih u modul. One obično imaju otvore za sprječavanje unutarnjeg pretjeranog tlaka. Moduli su opremljeni električnom zaštitom (osigurači) i sensorima za nadzor napona i (ponekad) temperature, i bilo pasivno ili aktivno ventilacijske djelove. Moduli su postavljeni i međusobno električno povezani s baterijom sustava upravljanja i razvodnom kutijom u vertikalnim regalima. Svaki stalak ima upravljanje baterijom na razini stalka sustava koji komunicira sa sensorima modula, a ima i jedan odnosno više DC konektora i osigurača. Regali su ugrađeni u kućište, koje se ponekad naziva jedinica za pohranu energije baterije, opremljena sustavom upravljanja baterijom na razini sustava za električnu kontrolu, grijanje, ventilacija, zrak, sustav klimatizacije i sustav za detekciju i suzbijanje požara. Interakcije sa sustavima napajanja i pražnjenja odvijaju se putem vanjskog sustava pretvorbe energije i sustava upravljanja energijom. Baterijske jedinice za pohranu energije imaju vrata za operativno osoblje i osoblje za održavanje te za ugradnju i zamjenu opreme. [23]



**Slika 12.** Prikaz litij-ionskog sustava [24]

Različite veličine jedinica za pohranu energije korištene su za prilagodbu različitim kapacitetima električne energije i snage potrebnim za različite primjene. Instalacije se nalaze u ruralnim, urbanim i prigradskim područjima, često u blizini solarne elektrane

ili generatora vjetroturbine radi punjenja baterija. Postoje i mnoge instalacije u kojima baterija za pohranu energije može se puniti putem električne mreže i često ima električne kontrole koje omogućuju pražnjenje kroz pretvarač i pomoćno sučelje natrag u mrežu. [23]

Postoji veliki broj skladišta energije gdje dolazi do požara akumulatora u posljednjih nekoliko godina. U Južnoj Koreji, koja ima daleko najveći broj baterijskih instalacija za pohranu energije, između kolovoza 2017. godine i prosinca 2018. godine zabilježena su 23 požara. Korejska vlada vođena istragom ovih incidenata otkrila je da je jedan važan uzrok požara bio neispravan sustav zaštite baterije. Zbog loše zaštite, kod nekih sustava došlo je do eksplozije. [23]

#### 5.1.1. Eksplozije toplinskog odbjeglog plina

Razlikujemo nekoliko stanja kvara, uključujući električne kvarove, prekomjerno punjenje i kontaminacija česticama ili vlagom. Takav kvar može dovesti do povišene temperature u jednoj litij-ionskoj ćeliji, uzrokujući propadanje i eventualni kvar separatora stanica, s naknadnom razgradnjom elektrolita i povišenim tlakom pare. To dovodi do termokemijskog odbjeglog odzračivanja u ćeliji koje se zatim može proširiti na mnoge druge ćelije u baterijskom modulu za pohranu energije. Prozračeni toplinski bijeg uzrokuje ispuštanje zapaljivog plina u bateriju u zatvorenom prostoru, gdje se nastala zapaljiva smjesa može zapaliti vrućim kućištem modula, električnim konektorom ili iskrom izbačene iz modula. Mogu se pojaviti tri različita oblika opasnosti od eksplozije odbjeglog plina. Prva opasnost je kada se zapaljiva plinska smjesa zapali ubrzo nakon što se formira u blizini inicijalnog modula, tako da postoji samo manja deflagracija i naknadni požar. Druga opasnost je kad baterije u toplinskom stanju otpuštaju zapaljive plinove bez početnog paljenja, a odgođena eksplozija povezana s nakupljanjem dodatnih plinova dovodi do zapaljive atmosfere. A kod treće opasnosti postoji početni požar s nakupljanjem produkata nepotpunog izgaranja i eventualno sredstvo za gašenje požara, dok se nešto ne dogodi. Kisik je dodatak bogatoj plinskoj smjesi i izuzetno je zapaljiv. [23,25,26]

#### 5.1.2. Incidenti s brzom eksplozijom

Baterijsko skladište energije od 1,0 MWh u Koreji primjer je incidenta u skladištu za pohranu energije u kojem je došlo do brzog toplinskog bijega. Sustav se sastojao od



15 regala, od kojih je svaki sadržavao devet modula, sadržavao je 22 litij-ionske ćelije od 94 Ah, 3,7 V. Sustav pretvorbe snage 250 kW bio je spojen na bateriju preko upravljačke ploče. Električna zaštita uključuje osigurače modula i osigurače stalka. Početni događaj u ovom incidentu bio je niz grešaka u sustavu pretvorbe. Kvarovi su se pojavili ubrzo nakon što je baterija bila potpuno napunjena (95 %), napunila se i počela prazniti. Međutim, pogreške sustava pretvorbe dovele su do preokreta struje i prisilnog punjenja baterije, s toplinskim bijegom kada je baterija bila na 90,8 % stanja napunjenosti (SOC). Električni kvarovi u ovom incidentu uzrokovali su neravnotežu napona ćelije i zemljospoja u jednom od baterijskih modula. Došlo je do neravnoteže napona ćelije unutar modula gdje je porasla na 3 V, dok proizvođač baterije preporučuje da se sustav isključi kada napon prelazi 0,10 V. Zabilježena temperatura ćelije porasla je za najmanje 64 °C, stvarajući temperaturu stanice veću od 80 °C što je prag za početak propadanja stanične membrane i egzotermne reakcije razgradnje. Podaci o bateriji prije početka toplinskog bijega sugeriraju da su zapaljivi plinovi raspadanja elektrolita ubrzo zapalili toplinski odsjek u najmanje jednom modulu. Za poboljšanje sigurnosti u korejskim skladišnim instalacijama baterija uključuju uređaje za zaštitu od prenapona i ograničenja stope punjenja i maksimuma dopuštenog stanja napunjenosti. U drugim baterijama do toplinskog bijega dolazi zbog zapaljivih plinova nakupljenih u kućištu baterije neko vrijeme zbog neadekvatnog ventilacijskog sustava što dovodi do paljenja koje je proizvelo različite razine oštećenja kućišta eksplozijom. [23, 25]

### 5.1.3. Eksplozije bljeska luka

Incidenati sustava za pohranu energije LIB uzrokovane električnim kvarovima koji uzrokuju eksploziju bljeska luka. Lučni bljesak dogodio se unutar neke vrste električnog kućišta koje nije moglo izdržati toplinska i tlačna opterećenja koja stvara bljesak luka. Jedan primjer električnog kućišta koji je dizajniran da izdrži ograničeni i kontrolirani bljesak luka je DC konektor. Svaki stalak u BESS kućištu je obično opremljen s najmanje jednim visokonaponskim DC konektorom za uspostavljanje i prekidanje električnih veza s modulima stalka. Sustav upravljanja baterijom također ima DC konektor za cjelokupni sustav struja punjenja i pražnjenja. U DC konektoru spajaju se stacionarni kontaktni konektori na vrhu DC konektora na električni krug stalka. Položaj pokretnog kontaktnog mosta je ovisno o prisutnosti ili odsutnosti struje u kontraktorskom svitku. Kada se kontaktni most približi ili odvoji od stacionarnog

kontakta nastaje električni luk. Budući da luk može prenijeti puno topline na kontakte, često se unutar njih nalazi plin u kućištu konektora za hlađenje. U nekim slučajevima, koristi se vodik, a u drugim se slučajevima u ovim konektorima koristi dušikov ili sumporov heksafluorid. DC konektori su naznačeni za njihov maksimalni radni napon i nazivno strujno opterećenje. Također mogu izdržati privremene prenapone za kratko vrijeme. Prekomjerne struje proizvode lukove veće energije pri otvaranju i zatvaranju kontakata, a oni mogu dovesti u pitanje snagu i toplinska otpornost keramičkog kućišta, koje često ima epoksid smolu za brtvljenje. Neki od korejskih požarnih incidenata u sustavima upravljanja baterijom navodno su bili zbog katastrofalnog kvara istosmjernih konektora zbog velikih električnih prenapona (povezani s uzemljenjem i kratkim spojevima) gdje osigurači nisu bili u mogućnosti prekinuti dovoljno brzo da se spriječi prekomjerna struja u DC konektoru. Problem o kojem se i dalje istražuje je tlak eksplozije od energetske lukove unutar DC konektora ili drugo električno kućište, kao što je baterijski modul ili zaštitno kućište stalka (unutar kojeg se nalaze DC konektori). *Chevrier* i suradnici pokazali su putem računalne dinamike fluida modeliranje i pokuse da struja luka uzrokuje jouleovo zagrijavanje i toplinsko zračenje plina između elektroda tako da ionizirani plinovi temperature lučnog plina su približno 15 000 K. Kombinacija širenje vrućeg ioniziranog plina i apsorpcija topline zračenja okolni plin je odgovoran za povećanje tlaka induciranog lukom u kućištu konektora. [23, 27]

## **5.2. Eksplozija u postrojenju APS (Arizona Public Service) McMicken Battery Energy Storage**

### **5.2.1 Opis postrojenja**

Baterije za pohranu energije sastavljene su od LIB-a koje proizvodi LG Chem. BESS se koristio svakodnevno kao resurs za punjenje solarnom energijom proizvedenom tijekom dana i ispuštao sunčevu energiju natrag u mrežu navečer kada solarni sustavi više ne proizvode energiju. Sastojao se od 36 pojedinačnih vertikalnih regala odvojenih u 2 reda s obje strane hodnika od 3 stope. Dvadeset sedam regala sadržavalo je po 14 baterijskih modula, koji su sadržavali 28 LIB ćelija (14 serija, 2 paralelne). Prikaz postrojenja McMicken Battery Energy Storage i opći izgled sustava prikazani su na slici 13.

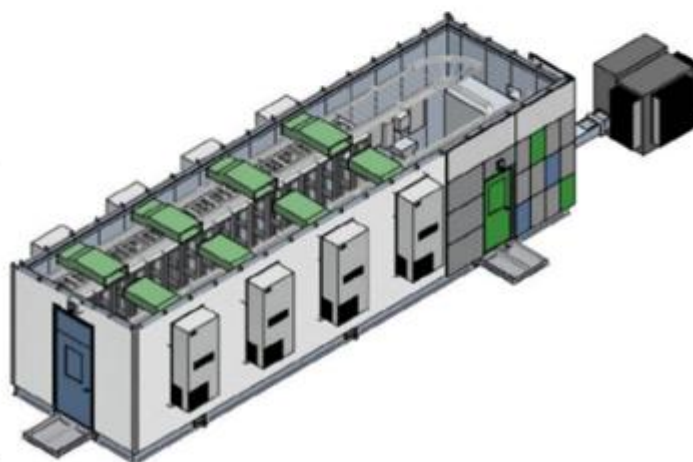
### 5.2.2. Tijek događaja prije i nakon eksplozije te uzorci eksplozije

Dana 19. travnja 2019., 25 mjeseci nakon što je BESS (engl. *Battery Energy Storage System*) pušten u rad, prijavljena je sumnja na požar. U 17:48 po lokalnom vremenu, prve ekipe stigle su na lokaciju istražiti sumnju na požar. Nekoliko sati kasnije, oko 20:04, iz unutrašnjosti je odjeknula eksplozija. Eksplozija je ozlijedila nekoliko vatrogasaca i uništila BESS i njegov kontejner.

Baterijska ćelija u modulu 2 regala 15 BESS-a doživjela je kvar zbog naglog pada napona tijekom ciklusa punjenja, ekvivalentan padu napona jedne ćelije (4,06 do 3,82 V). Modul 2 nalazio se na poziciji drugog modula, numeriran prema gore od baze stalka. Nekoliko trenutaka nakon što je došlo do pada napona, ćelija 7 u modulu 2 stalka 15 otišla je u toplinski bijeg. Ovaj događaj generirao je ispuštanje plinova i dim koji je aktivirao VESDA sustav za detekciju dima i doveo do otpuštanje agenta Novec 1230. Toplinski bijeg početne stanice kaskadirao se u toplinski bijeg susjedne ćelije unutar modula 2 i potom u baterije koje se nalaze unutar susjednih modula. Ispuštanje plinova baterijskih ćelija iz kaskadnog toplinskog odvoda stvorilo je zapaljivu atmosferu unutar BESS-a.



1.



2.

**Slika 13.** Prikaz postrojenja McMicken Battery Energy Storage i opći izgled sustava [28]

Nakon provedenog istraživanja donešeni su zaključci kako je došlo do nesreće modeliranjem istražnih rezultata stručnjaka, a to su:

- sumnja se da je požar zapravo bio opsežan kaskadni toplinski odbjegli događaj, koji je inicirao interni kvar ćelije unutar jedne baterije u BESS-u: par ćelija 7, modul 2, stalak 15 (baterija 7-2);
- vjeruje se do razumnog stupnja znanstvene sigurnosti da je ovaj unutarnji kvar prouzročio defekt unutarnje stanice, posebno abnormalno taloženje metala litija i rast dendrita unutar ćelija;
- sustav za suzbijanje požara s čistim sredstvom za potpunu poplavu instaliran u BESS-u radio je rano u 2014. godini incidenta i u skladu s njegovim dizajnom, no međutim, sustavi za suzbijanje požara čistim sredstvom jesu dizajnirani za

gašenje početnih požara u običnim zapaljivim tvarima. Takvi sustavi nisu sposobni za sprječavanje ili zaustavljanje kaskadnog toplinskog odlaska u BESS;

- kao rezultat toga, toplinski bijeg kaskadno se širio od ćelije 7-2 kroz svaku ćeliju i modul u stalak 15, putem prijenosa topline. Ovo širenje je olakšano nedostatkom odgovarajuće topline zaštitne barijere između baterijskih ćelija, koje su možda zaustavile ili usporile širenje toplinski bijeg;
- nekontrolirano kaskadiranje toplinskog odvoda od ćelije do ćelije, a zatim od modula do modula u Racku 15 dovela je do proizvodnje velike količine zapaljivih plinova unutar BESS-a. Analiza i modeliranje stručnjaka u ovoj istrazi potvrdilo je da su ti plinovi dovoljni za stvaranje zapaljive atmosfere unutar BESS spremnika;
- otprilike tri sata nakon početka toplinskog bijega, vrata BESS-a otvorili su vatrogasci, miješanje preostalih zapaljivih plinova i dopuštanje plinovima da dođu u kontakt s izvorom topline ili iskra.

Na slici 14. dan je prikaz postrojenja McMicken Battery Energy Storage nakon eksplozije, a uzroci zbog kojeg je došlo do eksplozije opisani su predhodno u tekstu, a u tablici 3. opisano je glavnih pet čimbenika koji su doveli do eksplozije.

**Tablica 3.** Pet čimbenika koji su doveli do eksplozije

<b>ČIMBENICI KOJI SU DOVELI DO EKSPLOZIJE</b>	
<b>I.</b>	unutarnji kvar u baterijskoj ćeliji izazvan termičkim bijegom
<b>II.</b>	sustav za suzbijanje požara nije bio u stanju zaustaviti toplinski bijeg
<b>III.</b>	nedostatak toplinskih barijera između stanica doveo je do kaskadnog toplinskog bijega
<b>IV.</b>	zapaljivi otpadni plinovi koncentrirani bez mogućnosti ventilacije
<b>V.</b>	plan odgovora na hitne slučajeve nije imao gašenje, ventilaciju i postupak upisa



**Slika 14.** Postrojenje McMicken Battery Energy Storage nakon eksplozije [28]

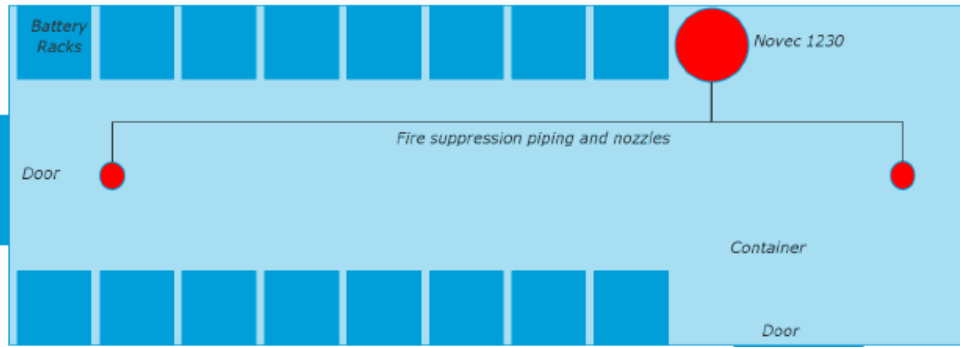
### 5.2.3. Sistem zaštite od požara u postrojenju

BESS je bio opremljen sustavom za suzbijanje požara s čistim sredstvom Novec 1230 "total flooding". U to vrijeme puštanja u rad, sustavi čistih sredstava bili su uobičajena metoda za upravljanje suzbijanjem požara u energetske postrojenjima, kod spremnika za skladištenje jer čista sredstva nisu električki vodljiva i ne ostavljaju talog. Takva sredstva se skladište pod tlakom u velikom cilindru spremnika. [28] Primjer takvog čistog sredstva prikazan je na slici 15. To je ukapljeni komprimirani plin bez mirisa i boje. Pohranjuje se kao tekućina i raspršuje se u opasnost kao bezbojna, električki nevodljiva para koja je bistra i ne zamagljuje vid. [29]



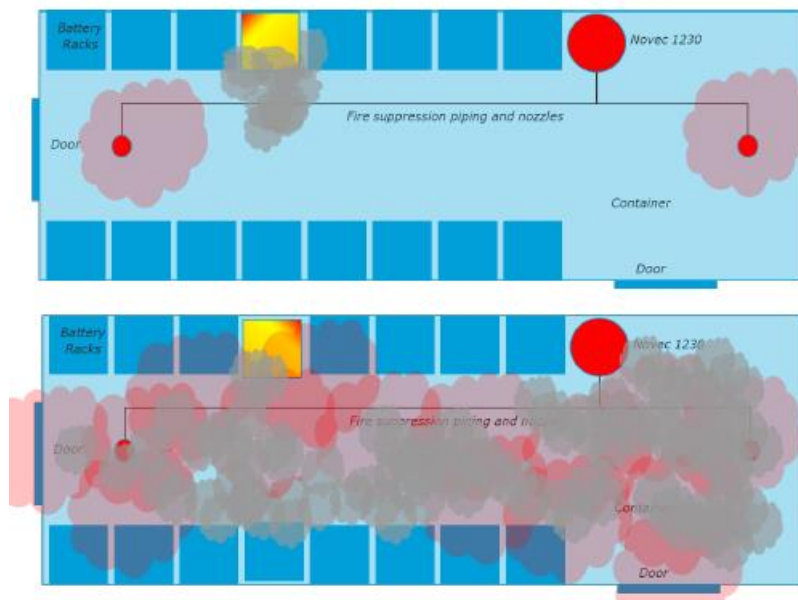
**Slika 15.** Prikaz sustava Novec 1230 „total flooding“ kao protupožarni sustav s visokotlačnim plinskim cilindrom [29]

Kada sustav za detekciju požara otkrije požar, sustav za suzbijanje požara ispušta sredstvo kroz sustav cjevovoda s mlaznicama postavljenim na strop. Proizvođač je dao uputu da čista sredstva ne mogu spriječiti ili suzbiti kaskadni toplinski bijeg u LIB-u. Postrojenje McMicken BESS sadržavao je aparat za vrlo rano otkrivanje dima (engl. *Very Early Smoke Detection Apparatus – VESDA*) koji se temelji na laseru za dim sustava detekcije. VESDA bi mogla otkriti fine čestice i smanjenu vidljivost (zbog dima) unutar prostorije, praćenjem bilo kakve smetnje laserske zrake. Senzori su ravnomjerno postavljeni duž stropa spremnika i doveli su se u središnju jedinicu napajanja s pohranom podataka. Nakon detekcije dima, VESDA sustav je poslao signal ploči za kontrolu i otpuštanje požarnog alarma, što je povezano sa signalom za pražnjenje sustava Novec 1230. Na slici 16. je prikazana jednostavna ilustracija postrojenja i unutar njega postavljenog sustava za detekciju požara.



**Slika 16.** Pojednostavljena ilustracija tipičnog sustava za suzbijanje požara unutar skladišta energije u postrojenju McMicken [28]

Provedena analiza BESS-a pretpostavlja da su se topliji, zapaljivi plinovi popeli na gornju razinu spremnika, dok se mješavina sustava Novec 1230 spustila zbog veće gustoće smjese i hladnije temperature. Tijekom vremena, topliji dižući zapaljivi plinovi istisnuli su mješavinu sustava Novec 1230 dok je iscurila do vrata i drugih brtvi u kontejneru. Količina vremena od početnog pražnjenja Noveca 1230 do otvora vrata pružila je mogućnost da se zapaljivi plinovi koncentriraju, a shematski prikaz takve situacije prikazan je na slici 17. [28]



**Slika 17.** Širenje zapaljivih plinova te njihovo koncentriranje pomoću mješavine sustava Novec 1230 dok se toplinska energija širila stakom [28]



#### 5.2.4. Istražna procedura

Istraživanje lokacije i postupak sanacije zahtijevali su da APS čuva lokaciju od zaštite drugih brojnih strana koje pokušavaju provesti vlastite neovisne istrage. BESS i njegov spremnik bili su znatno oštećeni događajem toplinskog bijega i eksplozije koja je uslijedila. Oba su vrata bila izbačena iz strukture, a stjenke kontejnera BESS bile su izbočene prema van, što možemo vidjeti na slici 18. Cijelo istraživanje trajalo je skoro četiri mjeseca.



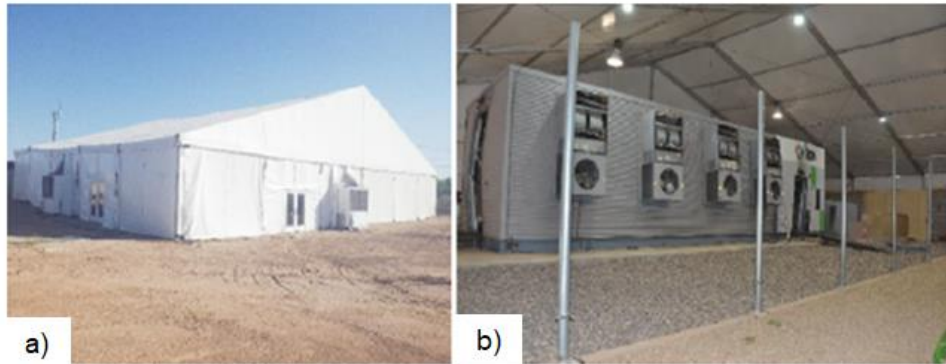
**Slika 18.** Prikaz postrojenja McMicken BESS-a nakon eksplozije, pod a) oštećenje stražnjih vrata i HVAC sustava, b) izbačena bočna vrata, c) krhotine i oštećenja stražnjih vrata i d) unutarnje oštećenje sustava [28]

APS je iz BESS-a preuzeo tri uređaja za koje se sumnjalo da sadrže korisne podatke za istragu, a to su:

- VESDA VLF-250 detektor dima (sustav za suzbijanje požara);
- glavni poslužitelj i diskovno polje;
- Schweitzer Engineering Laboratories SEL-751 zaštitni relej (praćenje sustava za gašenje požara, sustav kontrole okoline i detektor kvara na zemlji).

Istraga je pokazala da je sustav za detekciju dima VESDA prošao kroz sve četiri razine praga alarma unutar iste minute kada je dim prvi put otkriven i aktivirao sredstvo za suzbijanje požara 30 sekundi kasnije. Disk glavnog poslužitelja zahtijevao je napore za oporavak podataka zbog oštećenja i odgovarao je podacima koji su već snimljeni

putem APS-ovih sustava daljinskog nadzora. Zaštitni relej SEL-751 nije dao nikakve dodatne informacije u vezi s radom sustava koje je pratio. Kako bih se došlo do potrebnih informacija za istragu, područje oko postrojenja je bilo strogo zagrađeno i samo određeni su mogli pristupiti postrojenju pri istrazi. Oko postrojenja je postavljen siguran i ekološki kontroliran šator, što možemo vidjeti na slici 19.



**Slika 19.** Prikaz šatora s kontroliranim uvjetima koju je podigao APS kako bi sačuvala lokaciju BESS-a tijekom istrage, pod a) prikaz vanjskog dijela šatora i pod b) unutrašnji dio postrojenja ispod šatora [28]

Na temelju istrage utvrđeno je da je stalak 15 imao jako toplinsku oštećenje, dok susjedni regali nisu imali vidljive opekotine ili toplinska oštećenja, a samim tim stalak 15 bio je fokus istrage, a nalazio se oko sredine spremnika. Prije istrage bilo je potrebno isprazniti BESS baterijske module, što je trajalo 7 tjedana. Provela se forenzička procjena stalka 15 prije uklanjanja. Počelo je uklanjanjem komponenti koje nisu baterije, poput vrata i kablova. Uklonjen je i stalak 14 zbog oštećenja. U svakom koraku procesa dekonstrukcije spremnika, svim trećim stranama koje su sudjelovale bilo je dopušteno promatranje i dokumentiranje procesa. Svaki pojedinačni modul i njegove komponente (sve povezano sa stalkom 15) zapakirano je i otpremljeno u SEL-ov laboratorij sa sjedištem u Michiganu za dodatnu analizu. [28]

#### 5.2.5. Procjena štetnog utjecaja na okoliš

APS je angažirao ustanove (AECOM i Wood) da provedu procjenu svih mogućih ostataka na gradilištu i izvan njega zbog štetnog utjecaja na okoliš i zdravlje ljudi. Istraživanje posljedica nakon eksplozije u postrojenju uključivalo je prikupljanje i ocjenjivanje uzoraka medija iz okoliša na licu mjesta, kao što je površinsko tlo, izvođenje disperzije zrakom kako bi se provelo modeliranje za procjenu potencijala

utjecaja na okoliš izvan lokacije. Ova su istraživanja ispitala potencijalna izlaganja okoliša zabrinjavajućim onečišćujućim tvarima i nakon provedene analize nisu identificirali dokaz o bilo kakvim utjecajima na gradilištu ili izvan njega ili rizicima za ljudsko zdravlje ili okoliš. Nije bilo potrebno provesti sanaciju lokacije. Dodatno uzorkovanje drugih okolišnih medija, kao što su podzemne vode ili tlo, smatralo se nepotrebnim. [28]

### **5.3. Negativan utjecaj litij-ionskih baterija na okoliš**

Recikliranje istrošenih LIB-ova privlači izuzetnu pozornost u posljednjih nekoliko godina, zbog potražnje za korisnim metalima te negativnog utjecaja na okoliš zbog odlaganja čvrstog opasnog otpada. Nekontrolirano odlaganje ovih baterija predstavlja veliku opasnost za okoliš i značajno rasipanje vrijednih resursa. Baterijski metali poput litija, nikla, kobalta i mangana, kao i elektroliti mogu imati štetne učinke na ljudsko zdravlje i okoliš. Dosadašnja istraživanja nisu mogla procijeniti utjecaj na okoliš tijekom proizvodnje sirovina, proizvodnje baterija, distribuciju i transport, korištenje i zeleno recikliranje u kolektivnom načinu. Ne možemo reciklirati sve LIB jednom tehnikom, što u konačnici dovodi do komplikacija za daljnju obradu što dovodi do pravilnog odvajanja njegovih dijelova po vrsti i svojstvima. Zbog velikog odbacivanja iskorištenih LIB-ova, potrebno je provoditi gospodarenje otpadnim baterijama u zemlje u razvoju. [30]

## 6. SUSTAV ZAŠTITE NA RADU

Ugroženost ljudi na radnim mjestima je povećana zbog suvremene proizvodnje, njezine dinamike i složenosti. Javlja se gotovo u svim situacijama, a najčešće u procesima proizvodnje koji je automatiziran. Razlika od fizičkih ozljeda na radu koje dolaze pri fizičkom radu – upotreba ljudske snage (mišićni napor), koje su karakteristične za klasičnu proizvodnju, dolazi do novih oboljenja kao što su psihološka i profesionalna oboljenja zbog intelektualnog napora, psihološkog stresa zbog vremenskog roka za postizanje cilja. Posljedice su iste u oba slučaja jer su neposredni proizvođači ugroženi od ozljeda, profesionalnih i drugih oboljenja. [1]

### 6.1. Zakon o zaštiti na radu

Prema odredbama Zakona o zaštiti na radu (NN 96/18) Republike Hrvatske, postavljeni su temelji za određivanje pojma zaštite na radu. Sukladno tim odredbama zaštita na radu je skup mjera i pravila tehničke, zdravstvene, pedagoške, pravne, andragoške, psihološke, socijalne i druge naravi, kojima je svrha otkrivati i otklanjati opasnosti koje ugrožavaju život i zdravlje osoba na radu, radi očuvanja preostale radne sposobnosti.

U skladu sa navedenim Zakonom i drugim pravilima i propisima u svezi sa zaštitom na radu, poslodavac je dužan svakom zaposleniku omogućiti rad na siguran način, a zaposlenik je dužan pridržavati se svih propisanih pravila zaštite na radu.

Svrha zaštite na radu je sprječavanje nezgoda, ozljeda na radu i profesionalnih oboljenja, odnosno stvaranje uvjeta da do toga ne dođe. Nezgodom na radu nazivamo neželjeni, odnosno nepredviđeni događaj, koji nastaje kao posljedica poremećaja u odnosima čovjeka i radne okoline. Ako poremećaja nema vlada stanje dinamičke ravnoteže. Ravnotežu narušavaju opasni radni postupci ili opasni radni uvjeti, odnosno oboje zajedno.

Nezgodna može imati za posljedicu materijalni gubitak (štetu) i ozljedu pa čak i smrt. Dugotrajno izlaganje nezdravoj i štetnoj radnoj okolini izaziva profesionalna oboljenja. Kod pojave opasnih postupaka postoje određene zakonitosti, do pogreške čovjeka

dolazi zbog toga što neka osobina čovjeka nije u skladu sa zahtjevima rada. Pogreška najčešće nastaje ako zaposlenik ne zna sigurno raditi, ne može sigurno raditi i ne želi sigurno raditi.

Radi toga je dužnost svakog zaposlenika da rad obavlja na siguran način, što se postiže osposobljavanjem i stalnim usavršavanjem na svom radnom mjestu. Jednako tako, prilagođenjem mjesta rada zaposleniku, uređenjem radnog prostora, upotrebom sigurnih alata i oruđa za rad, opremanjem sredstvima zaštite, njihovim pravilnim korištenjem, dakle stvaranjem sigurne radne okoline, mogu se spriječiti nezgode na radu.

Posljedice nezgode na radu u materijalnom pogledu uzrokuju zastoj u proizvodnji, oštećenje sredstva rada ili oštećenje materijala. Međutim, nezgode koje imaju za posljedicu ozljedu na radu, lakšu ili težu, predstavljaju teret za ozlijeđenog zaposlenika, njegovu obitelj, tvrtku u kojoj je zaposlen i cijelu zajednicu. Troškovi liječenja i saniranja posljedica ozljede na radu su u pravilu vrlo veliki i predstavljaju ogromne gubitke za sve sudionike. Obzirom da se zaštita na radu promatra kao humana, socijalna i ekonomska kategorija, svaka nezgoda predstavlja trošak i zato je u svakom pogledu, ulaganje u zaštitu na radu dobitak.

U troškovima nezgoda na radu, oštećenja oruđa, alata i opreme, te ozljeda na radu i profesionalnih oboljenja, razlikujemo neposredne i posredne troškove.

Neposredni se troškovi odnose na trenutno popravljavanje stanja izazvanog nezgodom, i ona se mogu u materijalnom smislu definirati (primjerice kod materijalne štete popravak oštećenog sredstva, kupnja dijelova i slično, a kod ozljeda liječenje, naknada za bolovanje itd.). Posredni troškovi se, međutim, teško mogu izračunati jer je potrebno uzeti u obzir pretpostavljene štete, koje su posljedica te nezgode ili ozljede (primjerice karakteristično za elektroprivredu, štete nastale zbog neisporučene električne energije, pa vezano uz to štete korisnika električne energije itd.). Općenito se smatra da su posredni troškovi izazvani nezgodama na radu i do šest puta veći od neposrednih troškova. [1,31]

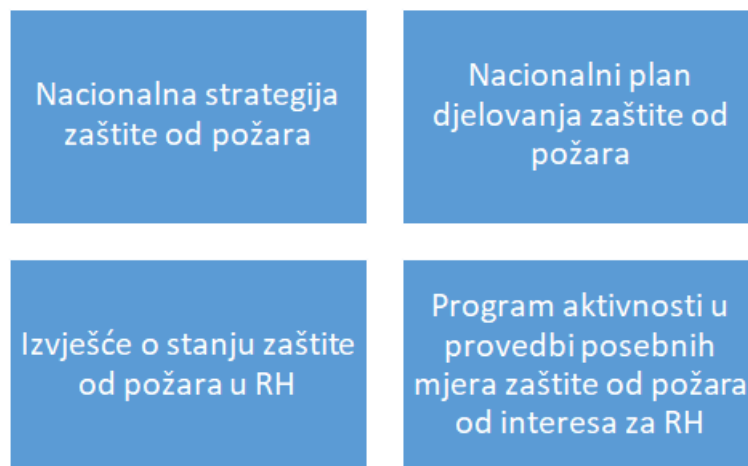
## **6.2. Zakon o zaštiti od požara**

Sustav zaštite od požara podrazumijeva planiranje zaštite od požara, propisivanje mjera zaštite od požara građevina, ustrojavanje subjekata zaštite od požara,

provođenje mjera zaštite od požara, financiranje zaštite od požara te osposobljavanje i ovlašćivanje za obavljanje poslova zaštite od požara, s ciljem zaštite života, zdravlja i sigurnosti ljudi i životinja te sigurnosti materijalnih dobara, okoliša i prirode od požara, uz društveno i gospodarski prihvatljiv požarni rizik.

U cilju zaštite od požara poduzimaju se organizacijske, tehničke i druge mjere i radnje kako bi se otklonile opasnosti od nastanka požara, zbog ranog otkrivanja, obavješćivanja te sprječavanje širenja i učinkovito gašenje požara, sigurno spašavanje ljudi i životinja ugroženih požarom, sprječavanje i smanjenje štetnih posljedica požara te utvrđivanje uzroka nastanka požara te otklanjanje njegovih posljedica.

Dokumenti zaštite od požara državne razine su prikazani na slici 20. [32]



**Slika 20.** Prikaz dokumenata na području RH za zaštitu od požara [32]

### 6.2.1 Pravilnik o zaštiti od požara u skladištima

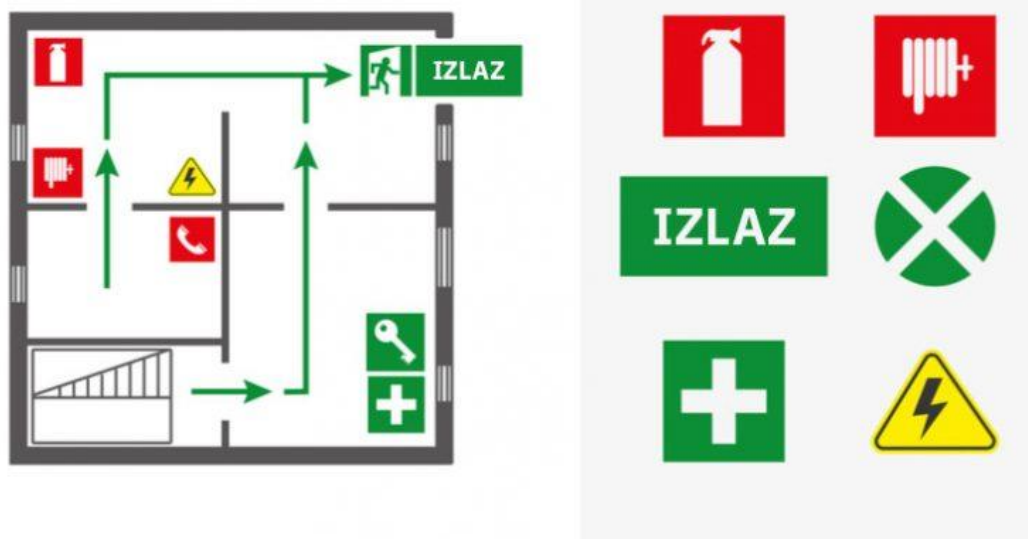
Pravilnikom o zaštiti od požara u skladištima (NN 93/08) propisuju se najmanji zahtjevi koje je potrebno ispuniti radi zaštite skladišta od požara i eksplozija. Skladišta su građevine ili prostori u sastavu građevina druge namjene u kojima se skladišti goriva roba ili negoriva roba u gorivoj ambalaži, uz mogućnost sklapanja robe bez dorade. U to se ne ubrajaju skladišta eksploziva, skladišta zapaljivih tekućina i plinova, skladišta opasnih tvari (radioaktivne, otrovi i druge), kontejnerska skladišta, skladišta ukupne zapremnine od poda do krovne ili međuetražne konstrukcije do 300 m<sup>3</sup> i skladišno-prodajne prostore u koje zalaze kupci (trgovački centri i slično). Kako bi se mogla pratiti

zaštita skladišta od požara potrebno je napraviti podjelu skladišta prema površini, što je prikazano u tablici 4.

**Tablica 4.** Podjela skladišta prema površini požarnog sektora i skladištenja robe

<b>SKLADIŠTA</b>			
<b>POVRŠINA POŽARNOG SEKTORA</b>		<b>SKLADIŠTENJE ROBE</b>	
Mala	do 1000 m <sup>2</sup>	klasična skladišta	do visine 9 m
Srednja	1000 – 3000 m <sup>2</sup>	visokoregalna skladišta	iznad visine 9 m
Velika	3000 – 6000 m <sup>2</sup>	silose	
	>6000 m <sup>2</sup>	hladnjače	

Skladište mora biti zaseban požarni sektor i u pravilu obuhvaća najviše jednu etažu. Roba se ne smije skladištiti iznad evakuacijskih putova. Otpornost na požar konstrukcijskih elemenata skladišta određuje se sukladno odredbama ovog Pravilnika ili prema odgovarajućim hrvatskim normama Eurocod. Vrata, kao i svi drugi otvori u konstrukcijama na granici požarnog sektora skladišta moraju imati istu otpornost na požar kao i konstrukcija u kojoj se vrata ili otvori nalaze. Skladišta propisana odredbama ovog Pravilnika moraju biti zaštićena unutarjom i vanjskom hidrantskom mrežom (silosi i hladnjače samo vanjskom) te aparatima za gašenje požara. Stabilni sustav za gašenje požara (sprinkler) ili drugi odgovarajući automatski sustav za gašenje požara mora proslijediti signal prorade na mjesto stalnog dežurstva. [33] Slika 21. prikazuje evakuacijski plan te bitne oznake kako bi se izbjegle nesreće.



Slika 21. Plan evakuacije [34]



## 7. ZAKLJUČAK

Svake godine proizvodnja LIB-a brzo raste, kao i njihova potrošnja u kućanstvu i industriji. LIB nalaze svoju primjenu uglavnom u prijenosnim elektroničkim uređajima (mobilni telefoni, prijenosna računala i kamere) zbog svojih prednosti, uključujući veliki raspon radnih temperatura, visoke gustoće energije, dugi životni ciklusi i osjetljiva otpornost na pražnjenje. Požari i eksplozije u skladištima mogu dovesti do, a neki od zaključaka su:

- ✓ nekoliko velikih incidenata požara, opisanih u radu, LIB-a za pohranu energijom, uključivali su eksplozije;
- ✓ do eksplozija je došlo kada su kućišta baterijskog sustava bila oštećena, uzrokovane deflagracijom akumuliranih zapaljivih plinova koji nastaju tijekom toplinskog bijega u ćeliji unutar jednog ili više modula;
- ✓ manje eksplozije često su posljedica bljeskova snažnog luka unutar modula ili električnih zaštitnih kućišta stalka;
- ✓ BESS sustavi moraju biti u skladu sa traženim popisom zahtjeva i moraju jamčiti, osim visoke gustoće energije i snage, dug životni ciklus i intrinzičnu sigurnost;
- ✓ na primjeru postrojenja McMicken Battery Energy Storage nije došlo do onečišćenja okoliša onečišćujućim tvarima nakon eksplozije što je potvrđeno inspekcijskom analizom;
- ✓ pridržavanjem Zakona (NN 96/18, NN 114/22) i Pravilnika (NN 93/08) mogu se izbjeći velike materijalne, ekološke i ljudske katastrofe;
- ✓ potrebno je postaviti pravilan sustav zaštite od požara;
- ✓ postavljeni senzori moraju imati mogućnost praćenja mehaničke deformacije i sastava ispuštenih plinova na licu mjesta;
- ✓ s porastom primjene LIB-ova u elektronici, generirao se i broj potrošenih LIB-a kojima je potreban postupak recikliranja kako bi se očuvali održivi resursi i spasio okoliš.

## 8. LITERATURA

1. Preventa – Centar za integralnu sigurnost, Pojam zaštite na radu, <https://preventa.hr/zastita-na-radu-upit/zastita-na-radu-pri-pekarskim-poslovima-pojam-zastite-na-radu>, pristupljeno 02.03.2023.
2. Jaycon Systems, BATTERIES 101: SIZES, TYPES, POWER, AND HAZARDS, <https://jayconsystems.com/blog/batteries-101-sizes-types-power-hazards>, pristupljeno 02.03.2023.
3. Engineers Garage, Introduction to batteries and their types, <https://www.engineersgarage.com/introduction-batteries-their-types/>, pristupljeno 02.03.2023.
4. Owens, B. B., Reale, P., i Scrosati, B.; „PRIMARY BATTERIES | Overview“, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, (2009), 22–27.
5. Kordesch, K., i Taucher-Mautner, W., „HISTORY | Primary Batteries“, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, (2009), 555–564.
6. Povijest baterija: Kako su nastale?, [https://www.marketing-odjel.com/povijest\\_baterija](https://www.marketing-odjel.com/povijest_baterija), pristupljeno 14.03.2023.
7. Terakota, Wikipedia, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Terakota>, pristupljeno 14.03.2023.
8. Hosseiny, S. S., i Wessling, M., „Ion exchange membranes for vanadium redox flow batteries“, Advanced Membrane Science and Technology for Sustainable Energy and Environmental Applications, (2011), 413–434.
9. IT and Consulting Consulting Firm BIS Of Sealed Secondary Cells/Batteries, <https://www.indiamart.com/proddetail/bis-of-sealed-secondary-cells-batteries-22012462191.html>, pristupljeno 02.03.2023.
10. Brodd, R. J., „SECONDARY BATTERIES | Overview“, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, (2009), 254–261.
11. Nishi, Y., „Past, Present and Future of Lithium-Ion Batteries“, Lithium-Ion Batteries, (2014), 21–39.
12. Hosaka, T., Kubota, K. i Komaba, S.; „Electrode materials for K-ion batteries“, Comprehensive Inorganic Chemistry III (Third Edition), (2023), 83-127.

13. Xie, J., Li, J., Wang, J., i Jiang., J.; „*Fire protection design of a lithium-ion battery warehouse based on numerical simulation results*“, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, **80** (2022).
14. <https://qbEurope.com/news-and-events/blog-articles/lithium-ion-battery-risks-in-warehousing-and-distribution/>, pristupljeno 15.03.2023.
15. Lithium-ion battery risks in Warehousing and Distribution, <https://blog.storemasta.com.au/fire-suppression-lithium-ion-batteries>, pristupljeno 15.03.2023.
16. Working of Lithium-ion Battery, <https://robu.in/working-of-lithium-ion-battery/>, pristupljeno 09. 06. 2023.
17. Viswanathan, B.; „*Batteries*“, Energy Sources, (2017), 263–313.
18. NIST, FDS and Smokeview, <https://www.nist.gov/services-resources/software/fds-and-smokeview>, pristupljeno 09. 06. 2023.
19. FDS Tutorial, What is FDS?, <https://fdstutorial.com/what-is-fds/>, pristupljeno 09. 06. 2023.
20. Vodič za procjenu rizika u malim i srednjim poduzećima, 7 Opasnosti od eksplozija, Identifikacija i procjena rizika; Provođenje mjera, 2010., <http://www.hzzsr.hr/wp-content/uploads/2016/11/Opasnost-od-eksplozija.pdf>, pristupljeno 06.06.2023.
21. What is Aqueous Vermiculite Dispersion (AVD)?, <https://www.avdfire.com/what-is-aqueous-vermiculite-dispersion/>, pristupljeno 19.03.2023.
22. Vermikulit, <http://bs.dikuang.com/vermiculite-products/>, pristupljeno 19.03.2023.
23. Zalosh, R., Gandhi, P., i Barowy, A.; „*Lithium-ion energy storage battery explosion incidents*“, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, **72** (2021).
24. Dotoli, M., Rocca, R., Giuliano, M., Nicol, G., Parussa, F., Baricco, M., Ferrari, A.M., Nervi, C., Sgroi, M.F.; „*A Review of Mechanical and Chemical Sensors for Automotive Li-Ion Battery Systems*“, Sensors, **22** (2022).
25. Guo, D., et al.; „*The causes of fire and explosion of lithium ion battery for Energy Storage. In: 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration*“, **13** (2018).

26. Baird, A., Archibald, E., Marr, K., Ezekoye, O.; „*Explosion hazards from lithium-ion battery vent gas*“, J. Power Sources 446 (2020).
27. Chevrier, P., Barrault, M., Flévet, C.; „*Hydrodynamic model for electrical arc modelling*“, IEEE Trans. Power Power Deliv, **11** (1996),1824–1829.
28. TECHNICAL SUPPORT FOR APS RELATED TO MCMICKEN THERMAL RUNAWAY AND EXPLOSION McMicken Battery Energy Storage System Event Technical Analysis and Recommendations Arizona Public Service, Document No.: 10209302-HOU-R-01 Issue: A, Status: Final Date: July 18, 2020.
29. Clean Agent Novec-1230 FK-5112 Total Flooding Fire System With High Pressure Gas Cylinder, <https://www.chinafiresafety.com/novec-1230-total-flood-system/clean-agent-novec-1230-fk-5112-total-flooding.html>, pristupljeno 10.06.2023.
30. Meshram, P., Mishra, A., Abhilash, i Sahu, R., „*Environmental impact of spent lithium ION batteries and green recycling perspectives by organic acids – A review*“, Chemosphere, (2019).
31. "Narodne novine" br. 96/18, Zakon o zaštiti na radu, <https://www.zakon.hr/z/167/Zakon-o-za%C5%A1titi-na-radu>, pristupljeno 15.03.2023.
32. "Narodne novine" br. 114/22, Zakon o zaštiti od požara, <https://www.zakon.hr/z/349/Zakon-o-za%C5%A1titi-od-po%C5%BEara>, pristupljeno 15.03.2023.
33. "Narodne novine" br. 93/08, Pravilnik o zaštiti od požara u skladištima, [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2008\\_08\\_93\\_2948.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2008_08_93_2948.html), pristupljeno 15.03.2023.
34. Vatrozaštita, Plan evakuacije, <https://vatrozastita.com/plan-evakuacije/>, pristupljeno 15.03.2023.

## 9. PRILOZI

### 9.1. Popis simbola

LIB – Litij-ionske baterije

FDS – engl. *fire dynamics software*

SOC – engl. *state of charge*

NIST – engl. *National Institute of Standards and Technology*

CFD – engl. *computational fluid dynamics*

BESS – engl. *Battery Energy Storage System*

VESDA – engl. *Very Early Smoke Detection Apparatus*

NN – Narodne novine

### 9.2. Popis slika

Slika 1. Jednostavni prikaz baterije [3] .....	2
Slika 2. Prvi bakterijski sustav [8] .....	4
Slika 3. Standardne veličine primarnih baterija [2] .....	5
Slika 4. Prikaz sekundarnih baterija [9] .....	6
Slika 5. Prikaz rada litij-ionske baterije [16] .....	8
Slika 6. a) prikazana je datotetka zadanog FDS-a, b) prikaz „smokeview-a“ u prostoriji [19] .....	13
Slika 7. Čimbenici koji utječu na sigurnost litij-ionske baterije [15] .....	15
Slika 8. Trokut eksplozije [20] .....	16
Slika 9. Izvori paljenja [20] .....	17
Slika 10. Vermikulit [22] .....	18
Slika 11. Prikaz gašenja požara vermikulitom [21] .....	20
Slika 12. Prikaz litij-ionskog sustava [24] .....	22
Slika 13. Prikaz postrojenja McMicken Battery Energy Storage i opći izgled sustava [28] .....	27
Slika 14. Postrojenje McMicken Battery Energy Storage nakon eksplozije [28] .....	29
Slika 15. Prikaz sustava Novec 1230 „total flooding“ kao protupožarni sustav s visokotlačnim plinskim cilindrom [29] .....	30
Slika 16. Pojednostavljena ilustracija tipičnog sustava za suzbijanje požara unutar skladišta energije u postrojenju McMicken [28] .....	31
Slika 17. Širenje zapaljivih plinova te njihovo koncentriranje pomoću mješavine sustava Novec 1230 dok se toplinska energija širila stalkom [28] .....	31

Slika 18. Prikaz postrojenja McMicken BESS-a nakon eksplozije, pod a) oštećenje stražnjih vrata i HVAC sustava, b) izbačena bočna vrata, c) krhotine i oštećenja stražnjih vrata i d) unutarnje oštećenje sustava [28] .....	32
Slika 19. Prikaz šatora s kontroliranim uvjetima koju je podigao APS kako bi sačuvala lokaciju BESS-a tijekom istrage, pod a) prikaz vanjskog djela šatora i pod b) unutarnji dio postrojenja ispod šatora [28] .....	33
Slika 20. Prikaz dokumenata na području RH za zaštitu od požara [32] .....	37
Slika 21. Plan evakuacije [34] .....	39

### **9.3. Popis tablica**

Tablica 1. Prikaz najčešćih sustava primarnih baterija [8] .....	5
Tablica 2. Prikaz najčešćih sustava sekundarnih baterija [8] .....	7
Tablica 3. Pet čimbenika koji su doveli do eksplozije .....	28
Tablica 4. Podjela skladišta prema površini požarnog sektora i skladištenja robe....	38