

Korištenje geoloških formacija za skladištenje različitih oblika energije

Tovarović, Dominik

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:533751>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Preddiplomski studij naftnog rudarstva

**KORIŠTENJE GEOLOŠKIH FORMACIJA ZA SKLADIŠTENJE RAZLIČITIH
OBLIKA ENERGIJE**

Završni rad

Dominik Tovarović

N4485

Zagreb, 2023.

KORIŠTENJE GEOLOŠKIH FORMACIJA ZA SKLADIŠTENJE RAZLIČITIH OBLIKA ENERGIJE

Dominik Tovarović

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Da bi se ostvarila energetska tranzicija neophodno je povećati korištenje obnovljivih izvora energije te minimalizirati rasipanje energije, na način da se višak energije uskladišti. Upravo kod rješavanja ovoga problema neophodno je podzemno skladištenje energije. Postoji nekoliko tehnologija koje mogu biti održivo rješenje za podzemno skladištenje energije za razne vrste ležišta (podzemnih skladišta). Tehnologije koje će biti razmatrane u ovom radu su: podzemno skladištenje plina (engl. *Underground Gas Storage*, UGS), podzemno skladištenje vodika (engl. *Underground Hydrogen Storage*, UHS), skladištenje energije komprimiranim zrakom (engl. *Compressed Air Energy Storage*, CAES), podzemno hidro pumpno skladištenje (engl. *Underground Pumped Hydro Storage*, UPHS) i podzemno skladištenje toplinske energije (engl. *Underground Thermal Energy Storage*, UTES). Neke od ovih tehnologija mogu biti primjenjivane u svakom tipu ležišta, ali neke su strože po pitanju kriterija koji određuju prihvatljivost ležišta i mogu se primjenjivati samo u određenim tipovima ležišta, o čemu će također biti riječi u ovom radu.

Ključne riječi: energetska tranzicija, skladištenje energije, porozna sredina, ne-porozna sredina, propusnost, učinkovitost, skladišni volumen

Završni rad sadrži: 31 stranicu, 1 tablicu, 6 slika i 28 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Domagoj Vulin, redoviti profesor RGNf
Dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar, redovita profesorica RGNf
Dr. sc. Iva Kolenković Močilac, docentica RGNf

Datum obrane: 2.6.2023., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	II
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA.....	III
1 UVOD.....	1
2 TEHNOLOGIJE PODZEMNOG SKLADIŠTENJA ENERGIJE	3
2.1 Ranija iskustva sa skladištenjem fluida ispod površine u usporedbi sa današnjim potrebama	3
2.2 Skladištenje u poroznoj sredini	4
2.3 Skladištenje u projektiranim šupljinama	4
2.4 Radni plin i plin za plinski jastuk kod oba tipa skladištenja	5
3 PODZEMNO SKLADIŠTENJE PRIRODNOG PLINA	7
3.1 Povijesni pregled	7
3.2 Skladištenje prirodnog plina.....	7
3.2.1 Skladištenje prirodnog plina u iscrpljenim naftnim i plinskim ležištima.....	8
3.2.2 Skladištenje prirodnog plina u akviferima.....	9
3.2.3 Skladištenje prirodnog plina u projektiranim skladištima odnosno u neporoznoj sredini.....	9
3.3 Metode pretvorbe električne energije u plin	11
4 PODZEMNO SKLADIŠTENJE VODIKA	14
5 SKLADIŠTENJE ENERGIJE KOMPRIMIRANOG ZRAKA	16
6 PODZEMNO HIDROELEKTRIČNO PUMPNO SKLADIŠTENJE ENERGIJE	19
7 PODZEMNO SKLADIŠTENJE TOPLINSKE ENERGIJE.....	22
8 USPOREDBA KONCEPATA PODZEMNOG SKLADIŠTENJA ENERGIJE ..	26

9	ZAKLJUČAK	28
10	LITERATURA	29

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Potencijalna ležišta za podzemno skladištenje energije.....	5
Slika 3-1. Solne strukture i podzemna skladišta energije u EU	10
Slika 3-2. P2G metode i njihove moguće primjene.....	13
Slika 5-1. Moguća konfiguracija dijabatskog CAES sustava.....	18
Slika 6-1. Skica UPHS sustava s površinskim i podzemnim spremnikom vode.....	21
Slika 7-1. Shematski prikaz najčešćih UTES sustava	25

POPIS TABLICA

Tablica 8-1. Usporedba različitih tehnologija skladištenja	26
--	----

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	OPIS
V_s	m^3	radni obujam skladišta
E	MWh	skladištena energija
ρ_e	MWh/ m^3	energetska gustoća skladištenja
η	%	efikasnost skladišta

1 UVOD

Svjetska potražnja za energijom konstantno raste, a ta potražnja značajno fluktuirala na razini godine, dakle nije jednaka potražnja u ljetnim ili zimskim mjesecima, pogotovo u podnebljima s hladnijim zimama kao što su SAD, Kanada, sjeverna, ali i srednja Europa. Kako bi se mogao postići prikladan odgovor na ovakve oscilacije u potražnji energije, jako je važno da ako u određenom trenutku postoji višak energije, da se ta energija može adekvatno uskladištiti. Na taj način, ne samo da se izbjegava rasipanje energije, nego se i osigurava dovoljna količina energije kada se potražnja poveća. Skladištenje energije pomaže sigurnosti opskrbe, što rezultira stabilnošću cijena i tržišta. Za skladištenje energije jako dobro mogu poslužiti razne pliće ili dublje geološke formacije, čije su najveće prednosti veliki volumeni te minimalni okolišni i socijalni utjecaji.

Cilj ovoga rada je opisati razne oblike podzemnog skladištenja energije te njihove prednosti i nedostatke. Podzemno skladištenje energije će također imati značajnu ulogu u energetske tranziciji koja se već dva desetljeća manje ili više uspješno pokušava provesti u djelo, jer se posljednjih godina svijet suočava sa značajnim klimatskim promjenama, stoga trenutni trendovi opskrbe svijeta energijom, gdje fosilna goriva i dalje zauzimaju oko 80% udjela ukupne svjetske energije (Environmental and Energy Study Institute, 2021), smatra se, nisu održivi. S ciljem ublažavanja efekata klimatskih promjena, 2015. godine donesen je Pariški sporazum prema kojemu je cilj da do 2050. godine svijet bude ugljično neutralan, odnosno bez emisija stakleničkih plinova. Europska unija je također definirala cilj da se do 2030. godine emisije stakleničkih plinova smanje za 40% u odnosu na 1990. godinu, s povećanjem korištenja obnovljivih izvora energije za 27% uz povećanje efikasnosti također za 27% (European Commission [EC], 2022). Da bi se ostvarili navedeni ciljevi potrebna su ogromna povećanja uloge električne energije, pri tome se misli na električnu energiju iz ugljično neutralnih izvora. Povećana proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije za električnu mrežu će značajno doprinijeti ostvarenju ciljeva Europske unije i smanjenju emisija stakleničkih plinova te energetske neovisnosti. Međutim, ovo također donosi i neke probleme u stabilnosti mreže i energetskom balansiranju, jer električna energija se rasipa tj. gubi ako se ne sačuva ili ne

potroši. Izražen slučaj rasipanja energije je kod primjene obnovljivih izvora energije, pogotovo sunčeve energije i energije vjetra koji su ovisni o vremenskim prilikama, pa njihova proizvodnja značajno oscilira, uz već prisutne probleme zbog pikova u potražnji. Kao posljedica toga, električne mreže se suočavaju sa poteškoćama u balansiranju između ponude i potražnje te tehničkim problemima u mreži.

2 TEHNOLOGIJE PODZEMNOG SKLADIŠTENJA ENERGIJE

2.1 Ranija iskustva sa skladištenjem fluida ispod površine u usporedbi sa današnjim potrebama

Dugoročno, tj. sezonsko skladištenje fluida u podzemnim formacijama je nekoliko desetljeća bilo rutinski provođeno u industriji ugljikovodika. Tako se slojna voda loše kvalitete, proizvedena zajedno s naftom utiskivala u solne formacije kako bi se smanjili utjecaji na okoliš. Osim toga, tehnologije podzemnog skladištenja energije pokušavaju replicirati procese skladištenja ugljikovodika u prirodi s minimalnim utjecajima na okoliš i zajednicu. Posljednjih godina utiskivanje CO₂ kao strategija za ublažavanje klimatskih promjena je također ostvarila vidljiv uspjeh i očekivalo se da će se u operaciji dosegnuti oko 40 Mt godišnjeg kapaciteta hvatanja do kraja 2017, (Matos et al., 2019). Unatoč dosadašnjem iskustvu skladištenja fluida u podzemlju, takve tehnologije su različite od podzemnog skladištenja energije u smislu vremena, jer je njihov cilj dugoročno skladištenje (beskonačno ako je moguće). Suprotno tome, skladištenje energije cilja na kratkoročno do srednjoročno skladištenje s razdobljima punjenja u trajanju od nekoliko sati do nekoliko mjeseci praćenih periodima pražnjenja uz proizvodnju energije koji slično traju. Tako se može zaključiti, da utiskivanje CO₂ u podzemne formacije ima bitno različiti utisni i ležišni mehanizam od tehnologija podzemnog skladištenja energije velikih razmjera (na primjer skladištenja prirodnog plina, skladištenja vodika ili čak skladištenja komprimiranog zraka). Utiskivanje CO₂ može značajno doprinijeti ublažavanju negativnih emisija i klimatskih promjena, dok tehnologije skladištenja energije imaju zadatak pohraniti energiju u obliku fluida, npr. energiju iz obnovljivih izvora pohraniti u podzemne formacije za kasniju upotrebu u mreži. Postoji motivacija za korištenje podzemnih formacija za skladištenje energije jer je povezna s već ranije spomenutim prednostima, a to su minimalni utjecaji na okoliš i zajednicu u usporedbi sa velikim površinskim objektima koji su potrebni da bi se ostvarili jednaki, veliki skladišni volumeni, a upotrebu tehnologija za podzemno skladištenje energije svakako olakšavaju do sad stečena iskustva iz naftne industrije. Skladišni volumeni koji mogu biti ostvareni u podzemnim geološkim formacijama variraju od nekoliko stotina kubnih metara u kavernama u soli dobivenih otapanjem soli do skladišnog prostora od nekoliko kubnih kilometara u sedimentnim stijenama. Ova razlika između korištenja poroznog

prostora i korištenja šupljina daje prvu razliku između prikladnih geoloških formacija, a odnos veličina te raspored pojedinih ležišta prikazan je na Slici 2-1.

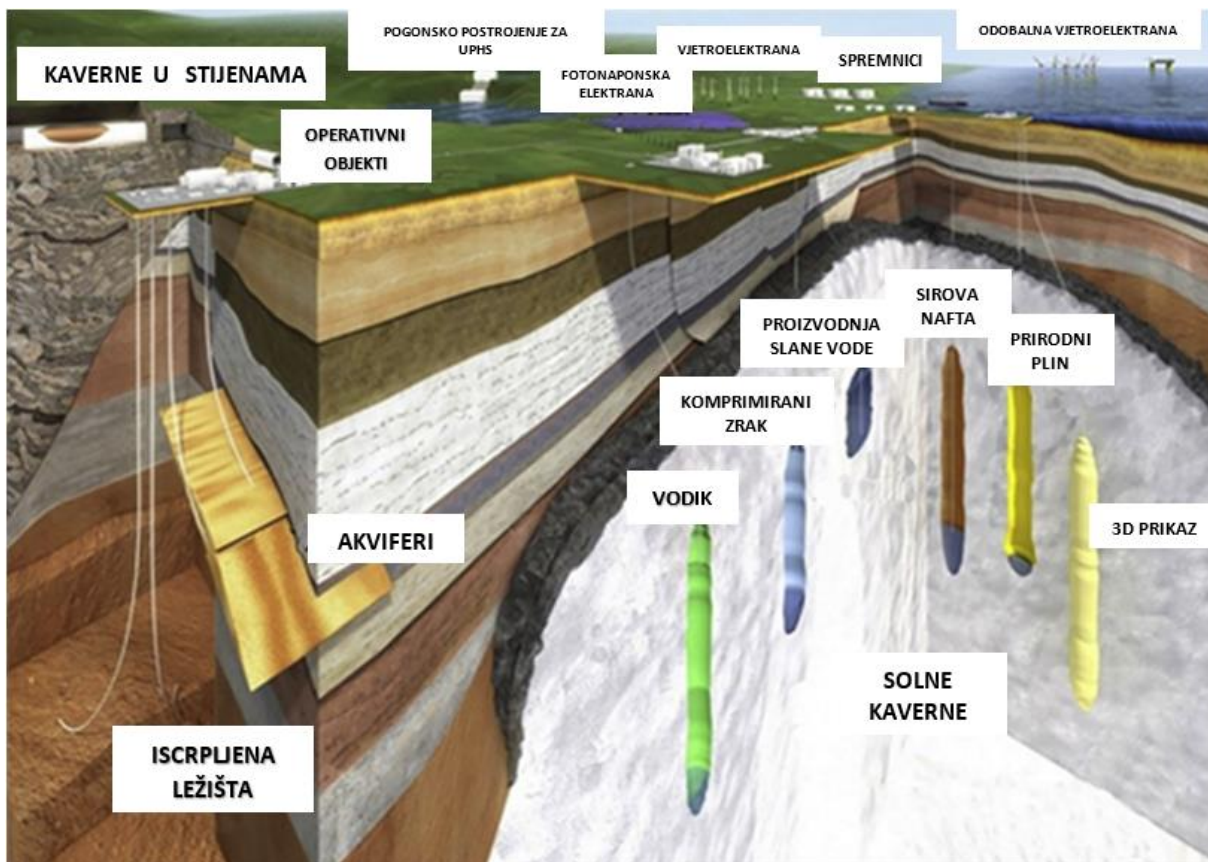
2.2 Skladištenje u poroznoj sredini

Kod skladištenja u stijeni se razmatraju svi tipovi poroznih stijena i cilj je ispuniti pore fluidom kojim se prenosi energija tako da ga se utisne u ciljanu stijenu, odnosno ležište kroz bušotine malih promjera povezane s površinskim objektima. Proizvodnja energije se odvija tako da se taj fluid opet pridobiva na površinu kroz te iste ili druge bušotine malih promjera. Stijena koja će se koristiti za skladištenje u poroznoj sredini mora istovremeno imati i veliku poroznost (da bi se osigurao što veći skladišni volumen) i veliku propusnost (za što bolju injektivnost i što veću brzinu punjenja i pražnjenja). Ova dva potrebna svojstva se najčešće mogu naći kao karakteristike sedimentnih stijena, kao što su pješčenjaci, vapnenci, konglomerati itd. Tipovi ležišta koji su uobičajeno razmatrani u sedimentnim stijenama su slani akviferi (s visokim salinitetom koji onemogućuje njihovo iskorištavanje za vodoopskrbu) i iskorištena ležišta ugljikovodika koja su dobro okarakterizirana, s dokazanim kapacitetom zadržavanja te iz kojih proizvodnja ugljikovodika više nije ekonomski izvediva. Skladištenje u poroznoj sredini može varirati do čak nekoliko kvadratnih kilometara površine i lateralnom granicom pohranjenog fluida koja je određena difuzijom. Pohranjeni fluid je obično u kontaktu sa primarnim slojnim fluidom, koji migrira do ruba oblaka pohranjenog fluida tijekom faze utiskivanja.

2.3 Skladištenje u projektiranim šupljinama

Ovakav tip skladištenja, odnosi se na konstrukciju podzemnih kaverni sa dobro definiranom geometrijom, koje često zauzimaju površinu od nekoliko stotina kvadratnih metara. Uskladišteni fluid može zauzimati sav raspoloživ prostor u šupljini, što je prednost ovakvog tipa ležišta. Šupljine mogu nastati otapanjem topive stijene kao što je sol ili iskapanjem tvrdih stijena kao što su graniti ili bazalti i mekih stijena kao na primjer šejlova i neraspucanih vapnenaca. Šupljine nastale prethodnim rudarskim aktivnostima također mogu biti korištene, ovisno o prethodno korištenim rudarskim tehnikama kao i uvjetima napuštanja rudnika. Za

razliku od poroznih sredina, konstruirane šupljine bolje osiguravaju da uskladišteni fluid ne migrira u okolne formacije s obzirom da imaju jako malu ili čak nikakvu poroznost i propusnost. Stoga su ciljana ležišta neraspucane magmatske i metamorfne stijene ili slabo propusne stijene. Posljednjih godina, istraživanja su fokusirana na mogućnost izoliranja (oblaganja) kaverni (engl. *Lined Rock Caverns*, LRC) da bi se osiguralo bolje zadržavanje fluida i skladištenje pod većim tlakom.



Slika 2-1. Potencijalna ležišta za podzemno skladištenje energije (preuređeno prema Matos et al., 2019)

2.4 Radni plin i plin za plinski jastuk kod oba tipa skladištenja

U osnovi, geološki skladišni objekt se priprema prije utiskivanja kako bi učinkovito stvorio podzemni spremnik pod tlakom. Tako se kod podzemnog skladištenja prirodnog plina, utiskuje plin, što dovodi do porasta tlaka te u tom smislu podzemna formacija postaje neka vrsta prirodnog spremnika plina pod tlakom. Što je više izbušenih bušotina i što je tlak veći, plin se može brže pridobivati nazad na površinu. Jednom kada tlak padne ispod tlaka na ušću bušotine,

više nema depresije, odnosno razlike u tlakovima koja bi gurala plin iz spremnika te pridobivanje više nije moguće. Iz navedenoga se može zaključiti da u podzemnom spremniku postoji određena količina plina koja nikada neće moći biti pridobivena, što je poznato kao fizički nepridobiv plin koji trajno zaostaje u formaciji. Iako se ovdje govori o podzemnom skladištenju prirodnog plina, ista filozofija je primjenjiva i na bilo koju drugu tehnologiju podzemnog skladištenja fluida koji prenose energiju o kojima će također biti riječi kasnije u ovome radu.

Kada je pohranjeni fluid u plinovitoj fazi, razlikuju se dva bitna pojma:

a) Radni plin, to je maksimalni volumen plina dostupan za crpljenje tijekom normalnog rada skladišnog objekta. Volumen skladišnog objekta se obično odnosi upravo na volumen radnog plina koji se može nalaziti u skladištu

b) Plinski jastuk (također poznat i kao bazni plin) predstavlja plin koji je trajno prisutan u ležištu. Ovaj plin nije dostupan za pridobivanje, i potreban je za održavanje minimalnog tlaka kako bi bilo dovoljno energije dostupno za povlačenje plina.

U solnim kavernama plinski jastuk može predstavljati plin potreban za održavanje minimalnog tlaka da bi se spriječilo urušavanje zidova kaverne prema unutra prirodnim puzanjem soli. Normalan omjer između radnog i jastučnog plina u solnim kavernama je oko 70% do 80% radnog plina naprema 20% do 30% plina za jastuk. Međutim u akviferima je potrebno 80% plinskog jastuka naprama samo 20% radnog plina, što znači za je količina plina dostupnog za pridobivanje znatno niža. U iscrpljenim ležištima ugljikovodika je potrebno održavati 50 do 60% postojećeg plina u formaciji kao plinski jastuk. (Matos et al., 2019)

3 PODZEMNO SKLADIŠTENJE PRIRODNOG PLINA

3.1 Povijesni pregled

Korištenje dubokih ležišta kao skladišta plina ima dugu i prosperitetnu povijest. Kanada se može smatrati pionirskom zemljom u korištenju ove tehnologije. Ondje je 1915. provedeno prvo podzemno skladištenje prirodnog plina (engl. *Underground Gas Storage*, UGS) u djelomično iscrpljenom plinskom polju u Welland oblasti, u Ontariu. Otprilike godinu dana kasnije, drugo najstarije skladište prirodnog plina (Zoar polje) je sagrađeno u New Yorku, a koristi se i danas (Molikova et al., 2021). Ove dvije države su prve prepoznale ekonomski potencijal i izvedivost podzemnog skladištenja te postavile tehnološke temelje za ovu industriju. Glavni faktori koji su utjecali na razvoj skladištenja plina su bili rast tržišta plina, postupno otkrivanje novih proizvodnih polja povezanih s potrebom za transportom do konzumacijskih područja i sezonskim fluktuacijama u potrošnji plina. Značajan porast podzemnog skladištenja prirodnog plina je zabilježen nakon Drugog svjetskog rata. Daljnji napredak u skladištenju plina je zabilježen u Kentuckyu 1946. gdje je prvi puta akvifer iskorišten kao podzemno skladište plina. Otopanjem rudarene kaverne u Michiganu su prvi put iskorištene kao UGS 1961., a skladištenje u solnim domama u Mississippi-u započelo je 1970. kao rezerva za poremećaje uslijed uragana (Beckman et al., 1995). Širom svijeta je 2018. bilo 689 objekata za podzemno skladištenje prirodnog plina (Molikova et al., 2021).

3.2 Skladištenje prirodnog plina

Podzemna skladišta prirodnog plina igraju važnu ulogu na energetsom tržištu. Ključni fenomeni kod podzemnog skladištenja prirodnog plina su sezonsko, tjedno, dnevno balansiranje između proizvodnje i potražnje, sigurnost opskrbe, optimizacija proizvodnje i transporta ugljikovodika, stabilizacija cijene plina itd. Skladištenje prirodnog plina se može provoditi pomoću svih ranije navedenih tehnologija. Najčešće su podzemna skladišta prirodnog plina razvijena u iscrpljenim naftnim i plinskim ležištima. Akviferi se obično koriste u područjima gdje nema ležišta ugljikovodika, slično je i s korištenjem kaverni, za koje su potrebni povoljni uvjeti (npr. postojanje debelih naslaga soli) i karakterizirana su manjim volumenima, ali većim brzinama crpljenja. Najveći broj podzemnih skladišta prirodnog plina

može se naći u Sjevernoj Americi, ukupnog volumena od oko $163 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, što Sjevernu Ameriku čini područjem s najvećim volumenom podzemnih skladišta prirodnog plina u svijetu. Dok u Europi, ukupan volumen podzemnih skladišta prirodnog plina iznosi oko $109 \cdot 10^9 \text{ m}^3$.

3.2.1 *Skladištenje prirodnog plina u iscrpljenim naftnim i plinskim ležištima*

Iscrpljena naftna i plinska ležišta su najčešće korištena vrsta podzemnih skladišta plina, zbog svoje ekonomske isplativosti, izvedivosti i dostupnosti već postojeće infrastrukture i tehnika rada koje su se koristile za crpljenje plina i nafte. To su dakle iscrpljene ili djelomično iscrpljene akumulacije ugljikovodika koje se nalaze na dubini od nekoliko stotina metara pa sve do približno 2000 metara. Rad je moguć s jednim do maksimalno dva potpuna kruga utiskivanja i povlačenja godišnje (Tarkowski, 2019). Generalno razmatrani parametri za stabilnost novog skladišta su bazirani na analizi geoloških podataka i fizičkim svojstvima geoloških struktura. Promatra se veličina i oblik geološke strukture, veličina akvifera, razdjelnica plin-voda (u slučaju iscrpljenih ili djelomično iscrpljenih ležišta), svojstva ležišta i stijene koje ga okružuju. Najvažniji fizički parametri kao što je već spomenuto ranije kod skladištenja u poroznoj sredini su poroznost (što veća poroznost to bolje), propusnost (određuje brzinu protoka plina i kapljevini te što je veća propusnost bolja su svojstva skladištenja) te zasićenje vodom koje je najbolje da bude što je manje moguće (ako je zasićenje vodom veliko tada je smanjen volumen dostupan za utiskivanje). Još jedan važan parametar koji određuje samu kvalitetu skladišta je režim pokretanja, koji diktira kretanje cijeloga plina u ležišnoj stijeni. On ovisi od sposobnosti akvifera da pomigne razdjelnicu plin-voda u ležišnoj stijeni prilikom punjenja ili pražnjenja. U stabilnom režimu otopljenog plina razdjelnica plin-voda je relativno stalna i u periodu utiskivanja i u periodu crpljenja. U takvim ležištima performansa je visoka, a problemi koji se pojavljuju su minimalni. Suprotan slučaj je kod vodonapornog režima gdje je performansa limitirana zbog proizvodnje vode i povećanja njezine proizvodnje u fazi crpljenja. U vodonapornom režimu je potrebno gurati vodu visokim tlakovima prema dolje. Iscrpljena ležišta dominiraju u broju podzemnih skladišta plina sa udjelom od oko 70% od ukupnog volumena plina pohranjenog u podzemnim skladištima prirodnog plina. Ukupno 504 podzemna skladišta prirodnog plina ovog tipa su u upotrebi širom svijeta (Molikova et al., 2021). Korištena iscrpljena ili djelomično iscrpljena naftna ležišta imaju karakteristike slične plinskim ležištima, uz iznimku procesa sekundarnog pridobivanja nafte, jer je pod određenim okolnostima moguće oporaviti vlastitu proizvodnju nafte kod naftnih ležišta, što je svakako

dodatna vrijednost skladišnoga projekta kao takvoga. U tom slučaju je potrebno ukloniti kapljevitu fazu ugljikovodika nakon pridobivanja plina iz skladišta prije distribucije u transportnu mrežu. Slična situacija, samo s preostalim plinom, događa se u iscrpljenim plinskim ležištima. Tada je prednost preostalog plina ta da ga koristimo za plinski jastuk. Potencijalna skladišna područja već rade u Argentini, Austriji, UK-u, Poljskoj i Njemačkoj (Thema et al., 2019).

3.2.2 *Skladištenje prirodnog plina u akviferima*

Za akvifere je potreban porozni sloj sa prikladnom antiklinalom ili adekvatnom strukturnom zamkom i odgovarajućim petrofizikalnim parametrima te sloj ispunjen vodom na dubini od nekoliko stotina metara do približno 2000 metara. Potrebne geološke karakteristike akvifera su slične karakteristikama u iscrpljenim plinskim ležištima s naglaskom na poroznost, propusnost, ležišni tlak i prikladni kapacitet. Da bi se uspostavilo podzemno skladište plina u akviferu, potrebna su prethodna detaljna istraživanja, što zahtijeva velika ulaganja. Naglasak je uglavnom stavljen na odgovarajuću vertikalnu nepropusnost pokrovne stijene i na obliku strukture sa položajem točke izlivanja koja mora biti orijentirana tako da sprječava migraciju plina. Ovi kriteriji moraju unaprijed biti precizno određeni i potvrđeni. Visoka cijena realizacije je uzrokovana uglavnom skupim geološkim istraživanjima, troškovima kupnje opreme, kao i uređaja za utiskivanje te izgradnje infrastrukture, bušotina i cjevovoda, a tu je i cijena plinskog jastuka čija veličina može ići i do 80% ukupnoga plina utisnutoga u akvifer. Većina utiskivanja i povlačenja plina se radi jednom godišnje, ponekad i dva puta, obično prije zime ili u zimi kada je potražnja za plinom očekivano najveća. 2018. bilo je 80 akvifera aktivno korištenih kao podzemna skladišta plina širom svijeta (Molikova et al., 2021). Primjeri potencijalnih skladišnih područja mogu se naći npr. u Francuskoj, Njemačkoj, Češkoj, Kanadi i Poljskoj (Thema et al., 2019).

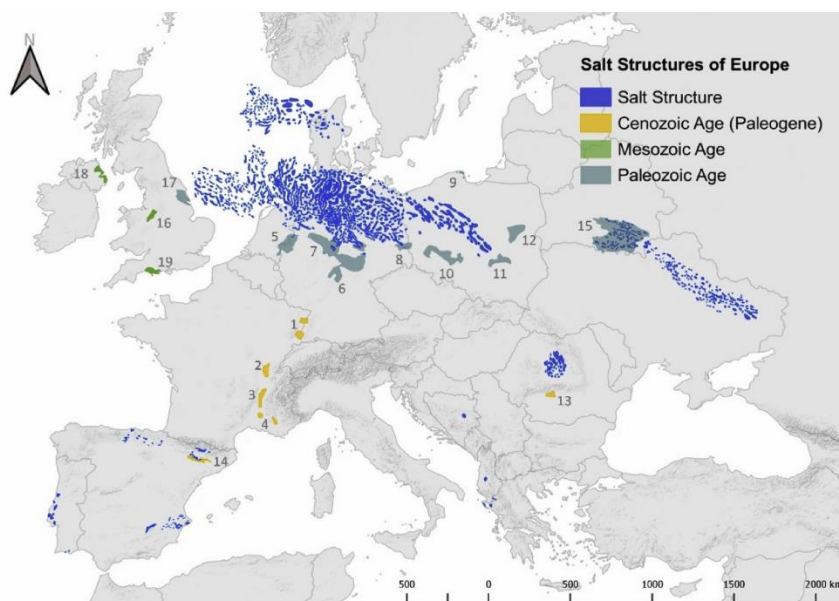
3.2.3 *Skladištenje prirodnog plina u projektiranim skladištima odnosno u ne-poroznoj sredini*

Kod ove tehnologije skladištenja prirodnog plina se najčešće koriste solne kaverne nastale prirodnim putem ili one konstruirane ispiranjem u solnim formacijama, dok su skladišta u obloženim ili ne obloženim tvrdim stijenama ili u napuštenim rudnicima za sada specifična i rijetka rješenja, iako postoji šansa da zbog povećane potražnje za skladištenjem u budućnosti poraste broj i ovakvih rješenja. Također, ova rješenja će imati važnu ulogu u budućnosti u

područjima gdje nema iscrpljenih naftnih i plinskih ležišta, zbog niza prednosti poput (Caglayan et al., 2020):

- Minimalni utjecaj na okoliš
- Niski investicijski troškovi u usporedbi s površinskim skladištenjem plina
- Relativno veliki skladišni kapaciteti zbog velikih volumena i visokog tlaka
- Veliki kapacitet brtvljenja kamene soli
- Minimalan potreban volumen plinskog jastuka
- Inertna priroda strukture soli
- Fleksibilan rad s velikom brzinom utiskivanja i povlačenja

Solne formacije se pojavljuju u dva oblika, kao kupole na većim dubinama i pliče locirane solne naslage, međutim nisu svugdje dostupne (Slika 3-1.)



Slika 3-1. Solne strukture i podzemna skladišta energije u EU (Caglayan et al., 2020)

Novo kaverne su dobivene otapanjem solnih formacija utiskivanjem svježe vode te crpljenjem dobivene slane vode. Pridobivena kaverna je okružena solnim slojem koji tako čini nepropusnu barijeru te sprječava gubitak plina u okolnim stijenama. Takva kaverna ima posebne geološke prednosti kao što su nepropusnost i prikladna mehanička svojstva sa

kemijskom otpornosti soli te kao takva kreira mehaničku stabilnost potrebnu za srednjoročno i za kratkoročno skladištenje. U ovakvom tipu podzemnog skladišta je moguće raditi višestruke krugove utiskivanja i povlačenja plina u jednoj godini. Solne kaverne teško mogu biti jednake ranije spomenutim tipovima podzemnih skladišta plina u smislu volumena, ali su idealne za zadovoljavanje potražnje na vrhuncu ciklusa. Važni faktori kao što su pristup tehnološkoj vodi i postojanju cjevovoda moraju biti unaprijed uzeti u obzir. U usporedbi sa drugim tipovima podzemnih skladišta, troškovi izrade takvih kaverni su definitivno viši. Podzemno skladištenje plina u solnim kavernama je u porastu i trenutno je u takvim skladištima pohranjeno 9% volumena ukupnog plina pohranjenog u podzemnim skladištima. Ukupno 101 solna kaverna je bila korištena kao podzemno skladište plina širom svijeta 2018.godine (Molikova et al., 2021). Pojavnost ovog tipa podzemnih skladišta je obilna u SAD-u u Great Lakes regiji, gdje ne postoji druga opcija skladištenja i duž obale zaljeva jer ondje postoji velik broj solnih doma (Lord, 2009). Ponekad se ovakva skladišta mogu naći u Kanadi i u Europi, u sljedećim državama: UK, Rumunjska, Njemačka, Poljska, Turska i Danska (Zivar et al, 2020). Nedavno je razmatrano da bi solne kaverne mogle biti korisne za skladištenje vodika, zbog specijalnih geoloških prednosti koje su navedene ranije.

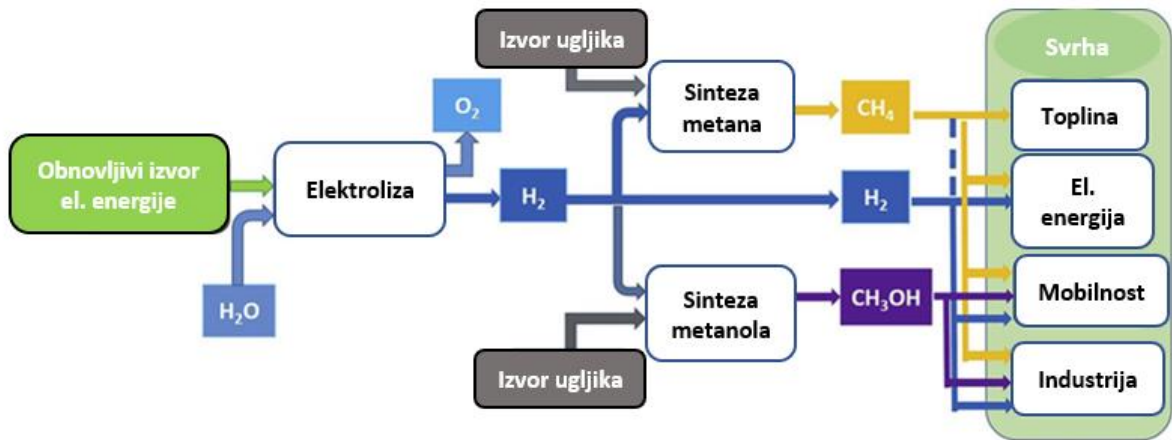
3.3 Metode pretvorbe električne energije u plin

S nedavnim trendom generiranja električne energije prirodnim plinom, potražnja za prirodnim plinom je porasla i tijekom ljetnih mjeseci (npr. zbog potražnje el. struje za pogon klima uređaja).

Za potrebe ovog rada ono što je relevantno je veza između tehnologije podzemnog skladištenja prirodnog plina i tehnologije el. energije u plin (engl. *Power to Gas*, P2G). P2G proces povezuje električnu mrežu s plinskom mrežom pretvaranjem viška el. energije u plin kompatibilan s mrežom. Ideja P2G je pretvoriti el. energiju iz obnovljivih izvora energije u plin, na primjer vodik ili metan koji može biti uskladišten pod zemljom u plinskoj infrastrukturi te kasnije korišten za dobivanje struje kada je vrhunac potražnje ili za različita područja potrošnje kao što su mobilnost, industrija, toplina, aplikacije za opskrbu i proizvodnju električne energije. Trenutno postoje tri P2G metode (Slika 3-2.) i sve koriste el. struju da bi se voda hidrolizom razdvojila na vodik i kisik. U prvoj metodi se nastali vodik utiskuje u mrežu prirodnog plina, te

koristi za ponovnu pretvorbu u el. energiju, u transportu ili u industriji. U drugoj metodi, koja je i najrelevantnija za tehnologiju podzemnog skladištenja prirodnog plina, vodik se kombinira sa ugljikovim dioksidom i ta se dva plina pretvaraju u metan takozvanom reakcijom metanacije (Sabatier-ova reakcija). Biološka metanacija rezultira biometanom i dodatnim gubitkom pretvorbe energije od 8%, a nastali metan poznat i kao supstituirani prirodni plin (engl. *Synthetic Natural Gas*, SNG) se tada može utiskivati u postojeću mrežu za distribuciju plina ili može biti pohranjen u skladištima plina, korišten kao gorivo za motore na stlačeni prirodni plin (engl. *Compressed Natural Gas*, CNG) ili može lako biti iskorišten u svim ostalim dobro uspostavljenim objektima za prirodni plin (Molikova et al., 2021). Treća metoda koristi izlazni plin, na primjer, generatora drvnog plina ili bioplinskog postrojenja i nakon toga se pojačivač bioplina miješa s proizvedenim vodikom iz elektrolizera, za poboljšanje kvalitete bioplina, nečistoće kao što je ugljikov dioksid, voda, sumporovodik i čestice moraju biti uklonjene iz bioplina ako se plin koristi za pohranu u cjevovodu da bi se spriječila oštećenja.

Glavni nedostaci P2G-a su relativno niska učinkovitost i visoki troškovi. U smislu učinkovitosti, trenutno dostupne tehnologije elektrolize koje daju vodik na 25 bara imaju električnu učinkovitost od 70% , ako reaktor za metanaciju radi na 20 bara, ima učinkovitost od 78% (maksimalna kemijska učinkovitost) i sa ugljikovim dioksidom već komprimiranim na 20 bara za reakciju metanacije (inače je prisutan dodatni gubitak učinkovitosti od 2%) (Matos et al., 2019). Općenito, nakon ovih procesa prosječna učinkovitost je oko 55% koja bi mogla biti poboljšana ako bi bila poboljšana učinkovitost elektrolize vode i ako bi se iskorištavala toplina od reaktora za metanaciju. Neki autori su pokazali da bi se korištenjem reverzibilnih elektrokemijskih ćelija od čvrstog oksida i recikliranjem ostatka topline tijekom procesa pohrane mogla dosegnuti povratna učinkovitost više od 70% uz niske troškove. Prema nekim autorima učinkovitost cijelog procesnog lanca od obnovljivih izvora energije do vodika koji se dovodi u visokotlačne mreže varira između 54 i 77% ovisno o korištenim tehnologijama kao i o lokalnim uvjetima (na primjer tlak mreže), a ako se vodik dalje pretvara u metan može se postići učinkovitost između 49 i 65% (Matos et al., 2019).



Slika 3-2. P2G metode i njihove moguće primjene (preuređeno prema Matos et al., 2019)

4 PODZEMNO SKLADIŠTENJE VODIKA

Vodik je kemijski element koji se često koristi kao resurs u kemijskoj industriji, ali se također pojavljuje kao gorivo za transport, a ima značenje i u skladištenju energije.

Podzemno skladištenje vodika (engl. *Underground Hydrogen Storage*, UHS) je korisno za pružanje skladištenja energije za mrežu iz povremenih izvora energije kao što je snaga vjetra, isto tako i za osiguravanje goriva za proizvodnju električne energije i za transport. Vodik tako može biti korišten i za kratkoročne primjene malih razmjera, ali isto tako i za dugoročne primjene velikih razmjera, što je svakako prednost.

Vodik za uloge skladištenja energije može biti proizveden elektrolizom vode pod visokim tlakom u P2G procesu korištenjem viška el. energije iz povremenih izvora, može biti utisnut u standardnu plinsku mrežu direktno ili nakon pretvorbe u sintetički plin ili može biti pohranjen u ležište za kasniju upotrebu i onda reelektrificiran kao što je već spomenuto u prethodnom P2G procesu za podzemno skladištenje plina.

Ova tehnologija ima relativno nisku učinkovitost oko 30% (Kroniger i Madlener, 2014). Druga za skladištenje energije (engl. *Energy Storage Association*, ESA) je na svojoj internetskoj stranici 2018. godine objavila da je učinkovitost punog ciklusa (pretvorba, utiskivanje, pridobivanje i ponovna pretvorba, engl. *round trip*) energetskog skladištenja vodika niska, od 30 do 40%, ali bi se mogla povećati do 50% ako bi bile razvijene učinkovitije tehnologije. Male količine vodika (do nekoliko MWh) mogu biti pohranjene u tlačnim plovilima na 100-300 bara ili ukapljene na 30,3 K ili alternativno čvrsti metalni hidridi ili nanocijevi mogu pohraniti vodik vrlo velikih gustoća. Teoretski, opcije podzemnog skladištenja vodika su slične onima koje se koriste za skladištenje prirodnog plina (iscrpljena plinska polja, slani akviferi i solne kaverne). Međutim prema njegovoj maloj molekularnoj veličini, vodik lako difundira i stoga zahtijeva visoku učinkovitost pokrovnih stijena podzemnih skladišt. Solne kaverne su zapravo najbolja opcija za skladištenje vodika jer je sol inertna u odnosu na vodik i predstavlja najučinkovitiji izolator, jer je praktički nepropusna za plin. Manji potencijal postoji u poroznoj sredini (iscrpljena naftna ležišta), napuštenim rudnicima ili u stijenama izdubljenim kavernama. Jako velike količine vodika mogu biti pohranjene u podzemnim solnim kavernama napravljenim ljudskim djelovanjem, čak 500.000 kubnih metra pri 200 bara, što

odgovara kapacitetu pohranjene snage od 167 GW vodika (100 GWh električne energije) (Energy Storage Association [ESA], 2018a). Trenutno se širom svijeta nalaze samo tri lokacije na kojima je implementirano skladištenje vodika, od kojih se dvije nalaze u SAD-u, a jedna u UK-u i sve su u solnim kavernama (Matos et al., 2019).

Godine 1983. u solnoj domi na dubini od 900 m u Teksasu (SAD) je izrađen objekt za skladištenje vodika naziva Clemens sa skladišnim volumenom od 580.000 kubnih metara. Ne tako davno, 2007. godine, sagrađen je drugi objekt za skladištenje vodika u SAD-u, a to je Moss Bluff, također u solnoj domi na dubini od 800 m sa skladišnim volumenom od 560.000 kubnih metara. Objekt u UK-u, u Teessideu je postavljen 1972. g. i sastoji se od tri kaverne u sloju soli sa skladišnim volumenom za svaku kavernu oko 70.000 metara kubnih na dubini od 350-450 metara (Williams et al., 2022). Nedavno, europski projekt HyUnder pružio je prvu procjenu širom Europe za potencijalno podzemno skladištenje vodika u solnim kavernama za obnovljive izvore električne energije na duži period. Njihovi zaključci su pokazali da je skladištenje vodikove energije kao dugoročan način skladištenja obnovljive energije putem elektrolize i podzemnog skladištenja ekonomski vrlo izazovno. Nadalje su ustanovili da je kratkoročno transportni sektor jedino tržište za koje se očekuje da će omogućiti prodajnu cijenu vodika koja može omogućiti komercijalni rad integrirane elektrolize i skladišta vodika (Matos et al., 2019).

5 SKLADIŠTENJE ENERGIJE KOMPRIMIRANOG ZRAKA

Skladištenje energije komprimiranog zraka (engl. *Compressed Air Energy Storage, CAES*) se u današnje vrijeme prikazuje kao tehnologija za skladištenje velikih količina električne energije u obliku stlačenog zraka (Matos et al., 2019). Tehnologijom skladištenja komprimiranog zraka električna energija se pretvara u mehaničku energiju korištenjem električne energije da bi se komprimirao zrak. Skladištenje male količine energije zahtijeva velike jedinice za skladištenje komprimiranog zraka na primjer u velikim podzemnim kavernama. U jedinici za skladištenje energije komprimiranog zraka, ambijentalni zrak je komprimiran i pohranjen pod tlakom u geološkom ležištu ili podzemnoj kaverni, a može također biti pohranjen i u površinskim spremnicima ili cijevima. Kada je opet potrebna električna energija, komprimirani zrak se zagrijava i ekspandira u turbini i tako pokreće generator.

Kompresijski lanac koristi međuhladnjake i naknadni hladnjak za smanjenje temperature utisnutog zraka čime se povećava učinkovitost kompresije i smanjuje se volumen potreban za skladištenje te se minimizira toplinsko naprezanje na stijenkama skladišnog prostora. Tijekom ekspanzije zrak se crpi iz skladišta i gorivo (obično prirodni plin) izgara u stlačeni zrak. Proizvodi izgaranja tada ekspandiraju (obično u dva stadija), generirajući električnu energiju.

Skladištenje energije komprimiranog zraka se može klasificirati u dvije skupine prema kapacitetu pohrane i tipu ležišta. Prvi tip je *Bulk CAES* koji zahtijeva velike podzemne geološke formacije, najekonomičniji je i može pohraniti stotine do tisuće MW za period duži od 5 sati. Drugi tip je *Small CAES* koji koristi objekte iznad površine, spremnike, cijevi i plovila da bi se pohranio komprimirani zrak i ima značajno manji kapacitet reda, obično veličine od 10 do 20 MW s vremenom pražnjenja kraćim od 5 sati. Jasno za ovaj rad relevantan je samo *Bulk CAES* jer je jedino on izvediv i ekonomičan za dugoročno skladištenje energije velikih razmjera u geološkim formacijama. Geološke formacije prikladne za CAES su kaverne u soli, iscrpljena ležišta ugljikovodika, akviferi, ali i napušteni rudnici i projektirane kaverne u stijenama, ukratko sve ranije navedene tehnologije podzemnog skladištenja energije. Kaverne u solnim formacijama je lakše razviti i operativno su manje zahtjevne, međutim formacije poroznih stijena su jeftinija opcija. Kaverne u tvrdim stijenama su također opcija za CAES, ali su i skuplja alternativa osim ako se radi o napuštenim rudnicima.

Prema načinu na koji CAES sustav upravlja toplinom generiranom u fazi kompresije, postoje različite vrste tehnologija koje imaju različite učinkovitosti:

1) Dijabatski CAES ili konvencionalni CAES je standardna i zrela tehnologija i ona rasipa toplinu proizvedenu u fazi kompresije, gdje se kompresija zraka za izgaranje odvaja neovisno o stvarnom procesu plinske turbine. Toplina se mora dodati tijekom procesa ekspanzije da se poveća kapacitet snage (Slika 5-1.). Učinkovitost jedinica baziranim na konvencionalnom CAES-u iznosi 42% bez korištenja otpadne topline, a s oporavkom topline osigurane tijekom faze ekspanzije iznosi 55% (ESA, 2018b).

2) Adijabatski CAES je nova tehnologija koja koristi uređaj za pohranu topline da hvata toplinu proizvedenu tijekom procesa kompresije i koristi tu toplinu da zagrije zrak tijekom procesa ekspanzije. Na taj način nema potrebe za spaljivanjem prirodnog plina. Tako ova tehnologija smanjuje emisije CO₂ i povećava učinkovitost procesa do 70%, čime se smanjuje ekonomska nesigurnost CAES-a (ESA, 2018b).

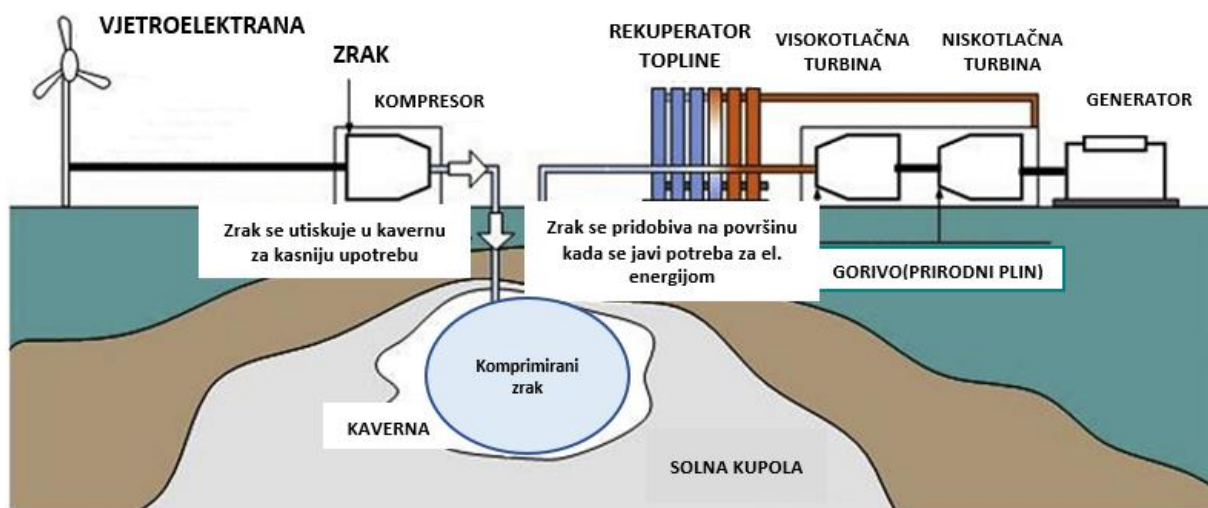
3) Izotermalni CAES je nastajuća tehnologija koja polako komprimira i ekspandira zrak te na taj način temperatura ostaje konstantna, a isto tako se eliminira potreba za spaljivanjem fosilnih goriva za zagrijavanje zraka tijekom faze ekspanzije. Potencijalno očekivana učinkovitost je negdje između 70 i 80% (ESA, 2018b). No, trenutno nema nijedne komercijalne jedinice za izotermalni CAES te je to i dalje nezrela tehnologija koja zahtijeva daljnja istraživanja.

CAES jedinice mogu regenerirati skoro 80% proizvodnje električne energije (s novim tehnologijama kao što je adijabatski CAES) za održavanje razvoja postrojenja baziranih na obnovljivim izvorima energije (engl. *Renewable Energy Source*, RES).

U svijetu trenutno postoje dvije komercijalne CAES jedinice bazirane na konvencionalnoj tehnologiji (Succar i Williams, 2008). Huntrof CAES jedinica u Njemačkoj je sagrađena 1978. godine u dvije solne kaverne s ukupnim volumenom od 310.000 kubnih metara, ima kapacitet snage od 290 MW i period pražnjenja u trajanju od 2 do 3 sata (Succar i Williams, 2008). U početku je imala svrhu pružanja usluga pokretanja nuklearnih jedinica u blizini Sjevernog mora i opskrbu jeftinom snagom na vrhuncu ciklusa, ali je s vremenom povećano njezino korištenje za pomoć u balansiranju sve brže rastuće proizvodnje energije vjetra iz sjeverne Njemačke.

McIntosh CAES jedinica u Alabami u SAD-u je u radu od 1991., koristi skladišni prostor od 560.000 m³ u solnoj kaverni sa kapacitetom snage od 110 MW i periodom pražnjenja u trajanju od približno 26 sati (Succar i Williams, 2008). Bila je sagrađena kao izvor jeftine snage na vrhuncu ciklusa da bi se moglo suočiti s cijenama nafte i plina. Postoji još nekoliko drugih CAES projekata procijenjenih, planiranih i razvijenih u SAD-u kao što su: Northon CAES u Ohiou za koji je planirano korištenje napuštenog rudnika vapnenca kao skladišnog spremnika za CAES objekt od 800 MW; Iowa Energy park, CAES projekt razvijen u akviferu i direktno spojen na vjetroelektranu sa očekivanim kapacitetom od 268 MW; CAES projekt u Matagordi u Teksasu za jedinicu od 540 MW i New York State Electric & Gas razvija 150 MW CAES projekt u solnoj kaverni i 9 MW sustav iznad površine (Matos et al., 2019).

Ima i nekoliko projekata razvijanih u Kini, Japanu i u Europi: Larne CAES projekt u Sjevernoj Irskoj i ADELE Adiabatic CAES u Njemačkoj. U Španjolskoj, tvrtka Endesa i američka neprofitna organizacija koja provodi istraživanje i razvoj u vezi s proizvodnjom, isporukom i korištenjem el. energije (engl. *Electric Power Research Institute*, EPRI) zajednički provode istraživanje za dvije potencijalne CAES jedinice.



Slika 5-1. Moguća konfiguracija dijabatskog CAES sustava (preuređeno prema Matos et al.,2019)

6 PODZEMNO HIDROELEKTRIČNO PUMPNO SKLADIŠTENJE ENERGIJE

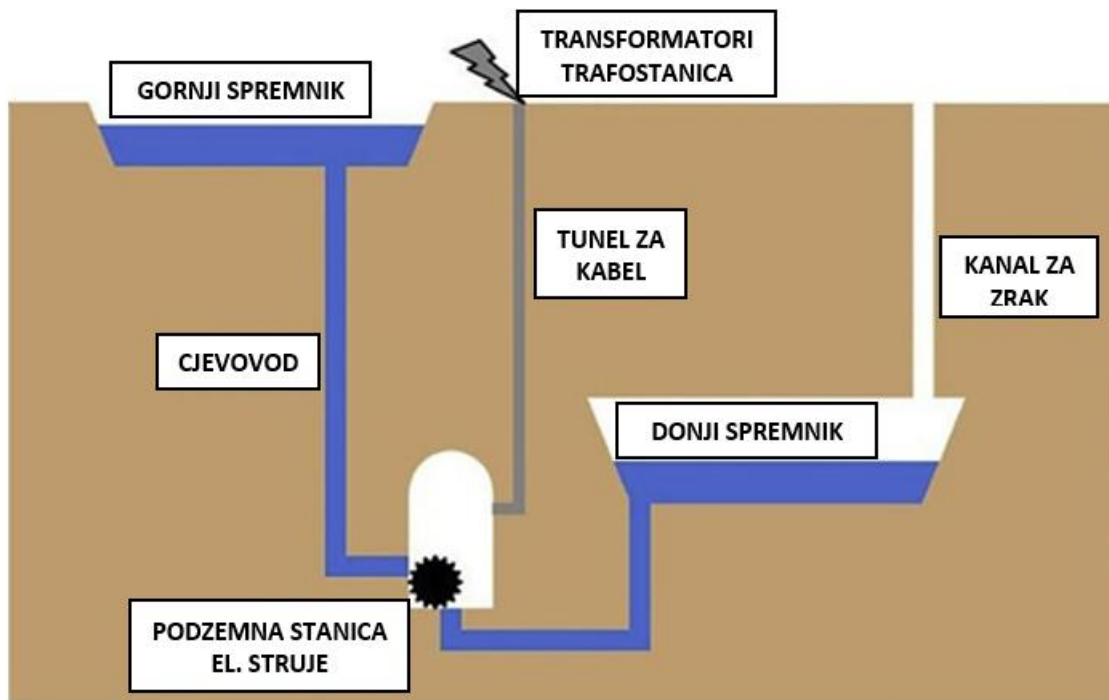
Sustav podzemnog hidroelektričnog pumpnog skladištenja energije (engl. *Underground Pumped Hydroelectric Storage*, UPHS) nije nova ideja, prisutna je još od 1970. godine i predstavlja adaptaciju konvencionalnog koncepta pumpnog hidroelektričnog skladištenja energije (engl. *Pumped Hydroelectric Storage*, PHS) u kojemu se koriste 2 površinska spremnika vode za pohranu i oporavak potencijalne energije vode pozicionirani na različitim visinama (Matos et al., 2019). Kod UPHS tehnologije donji spremnik je podzemna kaverna ili šupljina kao što se vidi i na Slici 6-1. Djelovanje gravitacijska energije je tako ostvareno razlikom u visinama između spremnika ili korištenjem velikih pumpi. Tako UPHS nije limitirana topografijom, pa je tako više područja dostupno za korištenje. UPHS je tako zamišljena kao modifikacija PHS tehnologije, ali u kojoj se eliminira ovisnost o topografiji, osigurane su više tlačne visine i reducirani utjecaji na stanovništvo i okoliš (na primjer, utjecaji na korištenje zemlje, vegetacije i život organizama), jer je utjecaj podzemne instalacije manji nego kod konvencionalnih pumpnih hidro sustava, s obzirom da je potreban samo jedan površinski spremnik. UPHS postrojenje eliminira nove riječne brane i velike elektrane na površini, smanjuje narušavanje staništa divljih životinja i smanjuje buku, na taj način osigurava fleksibilnost postavljanja te smanjuje troškove prijenosa, ali i dalje zadržava pouzdanost i dostupnost kao karakteristike PHS-a.

Podzemni spremnik može biti projektiran u prikladnim stijenama na različitim dubinama, za postrojenja malih razmjera (10 kW do 0,5 MW) podzemni spremnik može biti projektiran na način da komunicira s postojećim akviferom. Takve manje instalacije služe pojedinačnim korisnicima, malim zajednicama i poljoprivredi. Skladišta prikladna za UPHS velikih razmjera (1000 do 3000 MW) su projektirane šupljine ili napušteni rudnici. Neraspucane magmatske stijene pod malim bočnim opterećenjem smatraju se idealnim kandidatima, također se mogu koristiti i magmatske ekstruzivne, metamorfne ili sedimente stijene, ako imaju odgovarajuće geotehničke i hidrauličke karakteristike. (Matos et al., 2019)

Učinkovitost punog ciklusa (pretvorba, utiskivanje, pridobivanje i ponovna pretvorba) PHS sustava može značajno varirati, ovisno o stupnju razvoja tehnologije, pa iznosi oko 60% za starija postrojenja pa sve do 80% za najmodernija postrojenja. Učinkovitost pumpi i turbina ovisi o razlici hidrostatskog stupca između gornjeg i donjeg spremnika, što može varirati s vremenom i može lako biti predviđeno u PHS postrojenjima (s vodootpornim spremnicima), u UPHS postrojenjima utjecati mogu i promjene podzemnih voda (Pujades et al., 2017). Problem učinkovitosti kod UPHS-a nije šire istraživani, postoji relativno mali broj studija koje su se bavile ovim problemom. Međutim, neki autori su proučavali utjecaj promjena podzemne vode na učinkovitost i kako te promjene variraju ovisno o svojstvima sustava. Zaključeno je da: izmjene podzemne vode između podzemnog spremnika (u radu je to otvoreni kop) i vodonosnika ublažavaju razlike u visini između vodnog lica i površine vode u površinskom spremniku koje reduciraju radne tlakove pumpi i turbina, što rezultira pumpama/turbinama koje rade s većom učinkovitošću u UPHS postrojenjima nego u klasičnim PSH postrojenjima, utjecaj promjena podzemnih voda na učinkovitost se smanjuje kako se povećava kapacitet skladištenja podzemnog spremnika (Pujades et al., 2017).

Neki autori su radili ekonomsku analizu podzemnih pumpno akumulacijskih hidroelektrana u napuštenim rudnicima ugljena i zaključili su da su investicijski troškovi malo viši u usporedbi sa konvencionalnim PSH postrojenjima, ali ne potpuno izvan dosega.

Veliki UPHS sustavi su obično usmjereni na ublažavanje variranja opterećenja velikih urbanih središta ili kao sustav potpore varijabilnim obnovljivim izvorima energije. Potencijalne prednosti UPHS u smislu reduciranja utjecaja na okoliš, veće fleksibilnosti pri postavljanju i povećanja gospodarske konkurentnosti, su priznate od korištene industrije, u Sjevernoj Americi i inozemstvu. Do sada nema niti jednog postavljenog i korištenog UPHS sustava, komercijalno ili drugačije, ali Američko federalno energetske regulatorno povjerenstvo (*US Federal Energy Regulatory Commission*) je izdalo sedam dozvola za UPHS postrojenja s jednim podzemnim skladištem i jednu dozvolu za postrojenje s oba spremnika pod zemljom. Proučavani su i inženjerski izazovi prilikom postavljanja podzemnog pumpnog skladišta u rudniku vapnenca koji se nalazi u Summit oblasti u Ohiou. Također su proučavani i neki drugi projekti u Europi (na primjer u Nizozemskoj, Njemačkoj i Belgiji), ali i u Singapuru (Pujades et al., 2017).



Slika 6-1. Skica UPHS sustava s površinskim i podzemnim spremnikom vode (preuređeno prema Matos, 2019)

7 PODZEMNO SKLADIŠTENJE TOPLINSKE ENERGIJE

Skladištenje toplinske energije (engl. *Underground Thermal Energy Storage*, UTES) je sustav koji može pohraniti toplinsku energiju hlađenjem, zagrijavanjem, taljenjem, skrućivanjem ili isparavanjem materijala kao što je vruća voda, rastaljena sol ili materijal s faznom promjenom.

Sustavi skladištenja toplinske energije se mogu podijeliti u 3:

1) Skladištenje osjetne topline (engl. *Sensible Heat Storage*, SHS) koje se oslanja na temperaturne varijacije krutine ili kapljevine (npr. vode).

2) Latentno skladištenje topline (engl. *Latent Heat Storage*, LHS) koje se oslanja na toplinsku apsorpciju ili otpuštanje kada pohranjeni materijal prolazi kroz faznu promjenu iz krutog u tekuće ili iz tekućeg u plinsko stanje, a može i obratno.

3) Termokemijsko skladištenje topline (engl. *Thermochemical Heat Storage*, THS) je kada se proces temelji na reverzibilnoj kemijskoj reakciji koja je energetski zahtjevna u jednom smjeru, a daje energiju u obrnutom smjeru.

Sustavi bazirani na skladištenju osjetne topline su komercijalno dostupni, dok su ostali sustavi uglavnom još uvijek u razvoju i proučavanju (Qureshi et al., 2011). SHS može biti razvijen kao tehnologija malog razmjera (<10 MW) iznad površine ili kao sustav velikog slikarazmjera ispod površine.

Podzemno skladištenje toplinske energije (UTES) je oblik skladištenja energije koji osigurava sezonsko skladištenje hladnoće ili topline velikih razmjera u podzemnim ležištima (Nordell, 2012). Podzemlje je prikladno za toplinsko skladištenje energije, jer je jako toplinski inertno tj. ako je neometano ispod 10-15 metara dubine, temperatura tla je slabo pod utjecajem lokalnih klimatskih varijacija iznad tla i ostaje temperaturno stabilno. UTES može učinkovito pohraniti toplinsku energiju od ljetnog i zimskog ambijentalnog zraka, solarnu energiju ili otpadne nusproizvode topline od industrijskih i ostalih rashladnih procesa kao dugoročno i sezonsko skladištenje (Nordell, 2012). Tijekom perioda potražnje može osigurati hlađenje/grijanje/ventilaciju zraka s pothlađivanjem/pregrijavanjem i proces hlađenja.

Podzemno skladištenje osjetne topline, i u tekućem i u krutom stanju se obično koristi za primjene velikih razmjera. Različite tvari se mogu koristiti za skladištenje osjetne toplinske energije: ulje, rastaljene soli, voda i stijene.

Trenutno postoje tri česta oblika podzemnog skladištenja toplinske energije (Nordell, 2012), što je i shematski prikazano na Slici 7-1.:

1) Skladištenje toplinske energije u akviferu (engl. *Aquifer Thermal Energy Storage*, ATES) je sustav energije otvorene petlje koji koristi akvifer kao medij za pohranu toplinske energije i podzemnu vodu kao prijenosnik toplinske energije. U takvim postavkama energija se može i utiskivati u akvifer i pridobivati iz akvifera korištenjem jedne ili više utisnih i proizvodnih bušotina, povezanih preko hidrauličnih pumpi i izmjenjivača topline. ATES je plitka geotermalna tehnologija s najvišom energetsom učinkovitošću i prikladna je za sezonsko skladištenje energije. Skladišna učinkovitost ATES-a prilikom hladnog skladištenja može varirati od 70 do 100% za dugoročne projekte hladnog skladištenja (Dickinson et al., 2009). U slučaju skladištenja topline (koje uključuje utiskivanje, skladištenja i crpljenje zagrijane vode u prikladnom skladišnom akviferu) učinkovitost je obično manja nego kod hladnog skladištenja i varira između 50 i 80% (Dickinson et al., 2009). Integrirani, odnosno kombinirani ATES sustavi za hladno i toplo skladištenje mogu povećati učinkovitost samo za hladno ili samo za toplo skladištenje, posebno u aplikacijama velikih razmjera.

2) Skladištenje topline u bušotinama u stijenama (engl. *Borehole Thermal Energy Storage*, BTES) ima isti princip rada kao i ATES. Međutim, to je sustav zatvorene petlje koji pohranjuje energiju u ležišnoj stijeni koristeći bušotinske izmjenjivače topline (ponekad više od 100 bušotina). BTES nije limitiran specijalnim lokacijama ležišta kao što su akviferi i ova tehnologija je najprikladnija za skladištenje hladnoće i topline te upotrebu kod krajnjeg korisnika. Ova tehnologija primjerice omogućava skladištenje topline iz zgrada tijekom ljetnih mjeseci ili topline prikupljene preko solarnih panela te njezinu ponovnu upotrebu kada nastupi potreba za grijanjem tijekom zime. Tako je ovo obično sustav za dugoročno sezonsko skladištenje toplinske energije. BTES sustavi na danim lokacijama mogu biti pod utjecajem

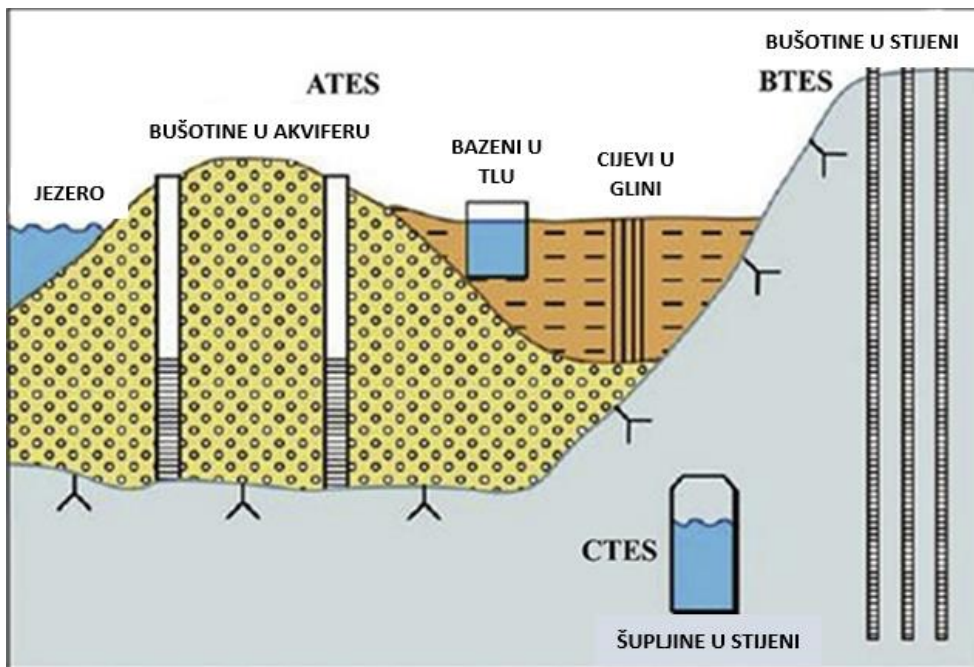
prirodnog toka podzemne vode, pa njihova učinkovitost može doseći do 40% (Matos et al., 2019).

3) Skladištenje toplinske energije u kavernama (engl. *Rock Cavern Thermal Energy Storage*, CTES) temelji se na konstruiranim kavernama kao ležištima podzemne vode. Kaverne mogu biti specijalno rudarene da bi služile kao ležišta za skladištenje toplinske energije, a mogu poslužiti prenamijenjeni napušteni rudnici. CTES ima prednost pružanja velike snage punjenja i pražnjenja jednostavnim bržim pumpanjem vode u i iz kaverne. Međutim, zbog visokih investicijskih troškova postoji mali broj ovakvih aplikacija danas. (Matos et al., 2019)

Prikladnost ovih tehnologija skladištenja toplinske energije ovisi od lokalnim uvjetima na lokaciji, uključujući geološke i hidrogeološke uvjete (Nordell, 2012). ATES je najpovoljnija tehnologija za primjene velikih razmjera, dok je BTES najopćenitiji sustav, jer se može primjenjivati bilo gdje i bilo kojih razmjera. CTES je najprikladniji za punjenje i pražnjenje, ali jako varira zbog ekstremno visoke potražnje za snagom. Opseg UTES-a može također uključivati plitke termalne i duboke termalne koncepte koji se, kako samo ime kaže, razlikuju po dubini. Međutim, razlika između duboke i plitke topline nije u potpunosti uspostavljena. S jedne strane ovaj koncept je povezan s geotermalnom energijom, gdje se plitkom toplinom smatra korištenje plitkog geotermalnog resursa kao što je to kod primjera ATES-a ili čak BTES-a koje obično ne idu dublje od 300 ili 400 metara prema vladinim definicijama u nekoliko zemalja te koriste normalne temperature tla s izravnom primjenom za grijanje i hlađenje (korištenjem toplinskih pumpi) (Matos et al., 2019).

S druge strane duboke toplinske bušotine (BTES), također i CTES mogu koristiti duboke bušotine ili kaverne duboke više od 300 do 400 metara s višim temperaturama uslijed višeg geotermalnog gradijenta. UTES omogućuje učinkovitije korištenje novih obnovljivih izvora energije kao što su solarna ili geotermalna energija te povrat otpadne topline/hladnoće za grijanje i hlađenje prostora.

Postoji nekoliko primjera UTES-a širom svijeta, posebno ATES-a i BTES-a kao tehnologija korištenih za grijanje i hlađenje zgrada ili kao sustava za daljinsko grijanje. Primjer CTES-a je Mine Water Thermal Storage u južnom dijelu Nizozemske gdje je udaljeni sustav za grijanje pušten u pogon u listopadu 2008. godine (Matos et al., 2019).



Slika 7-1. Shematski prikaz najčešćih UTES sustava (preuređeno prema Matos, 2019)

8 USPOREDBA KONCEPATA PODZEMNOG SKLADIŠTENJA ENERGIJE

Cilj rada je bio pokazati učinkovitost podzemnog skladištenja energije i usporediti je s već široko primijenjenim tehnologijama skladištenja.

Ovi podatci se razlikuju i limitirani su u literaturi, te je usporedba dana za različite tehnologije (Tablica 8-1.). Primjerice, za obnovljive izvore energije, baterije su prva opcija skladištenja, međutim, postavlja se pitanje koliki je obujam (V_s , m³) tj. energetska gustoća skladištenja (ρ_e - izraženo po obujmu):

$$\rho_e = \frac{E}{V_s} \quad (1)$$

Pri tome su u jednadžbi (1) u tablici 1 sljedeće oznake:

V_s – radni obujam skladišta, m³

E – skladištena energija, MWh

ρ_e – energetska gustoća skladištenja, MWh/m³

η - efikasnost skladišta, %

Tablica 8-1. Usporedba različitih tehnologija skladištenja

tehnologija	V_s	E	ρ_e	η	funktionalnost
PSP	438000000 ^[d]	4300000 ^[e]	$9,82 \times 10^{-3}$	-	priključeno na transportnu mrežu ^[e]
A-CAES	-	10 ^[a] , 300 ^[b]	-	-	planirano ^[a] , operativno/spojeno na mrežu ^[b]
H2	500000	133000	0,53 (Gas, 20 MPa) ^[c] 2,36 (liquid, -253°C) ^[c]	60 ^[c]	iz studije ^[c]
UPHS	48830000 ^[f]	400000 ^[f]	$8,19 \times 10^{-3}$	-	operativno ^[f]
ATES	(10000-150000) ^[g]	(2800 sustava u EU daje 2,5 TWh godišnje) ^[g]	-	50-100	operativni sustavi
BTES	323000 ^[h]	10000 ^[h]	0,03096	40	operativno ^[h]
CTES	1000000 ^[i]	90000 ^[i]	0,09	-	planirano ^[i]

Primjeri u tablici za PSP, A-CAES, H2, UPHS te BTES i CTES se odnose na konkretne primjere ležišta (podzemnih skladišta), dok se podaci za ATES zbog nedostatka konkretnih podataka za određeno ležište odnose na više ležišta u kojima se provodi ova tehnologija.

9 ZAKLJUČAK

Sve navedene tehnologije imaju svoj potencijal, ovisno o geoprostornim parametrima, izvorima energije te općenito proizvedenoj energiji, suvišku energije i oscilacijama u potražnji za energijom. Daljnji razvoj se može ostvariti jedino istraživanjima i ulaganjem u ove tehnologije podzemnog skladištenja energije, tako da bi one mogle igrati važnu ulogu u energetske tranziciji. Energetska tranzicija nije brz proces i, uz postupno smanjenje potrebe za fosilnim gorivima kao glavnim izvorima energije kroz nekoliko desetljeća, brzina razvoja pojedine tehnologije skladištenja energije, odredit će i njene troškove, a sustav ujednačavanja (balansiranja) potreba i proizvodnje energije, te postizanje energetske sigurnosti razvit će se u sofisticiranu i diversificiranu energetska platformu. Kako to uključuje pretpostavku da će trebati koristiti sve raspoložive resurse za proizvodnju, skladištenje i balansiranje potrošnje energije, jasno je da korištenje jednog izvora energije nikako ne bi trebalo isključivati korištenje onog drugog, a isto vrijedi i za skladišta (velikih količina) energije.

Zaključno, gledajući popularnost i prihvaćenost novih tehnologija, za očekivati je da će se prvo razmatrati podzemna skladišta vodika, jer sami proces transporta i skladištenja najviše liči dobro istraženom tehnologiji za podzemno skladište prirodnog plina, a također, u smislu tranzicije, istaknuta je ideja umješavanja vodika u transportni sustav za prirodni plin, što vodi ka zaključku da se takva smjesa može i skladištiti u postojećim skladištima prirodnog plina. Međutim, vodik ima manju volumnu energetska gustoću od prirodnog plina, čak i pri velikim tlakovima, tj. u uvjetima podzemnih skladišta plina, što znači da za skladištenje velikih količina vodika (a ne samo umiješanog, s oko 10% molnog udjela u prirodnom plinu) treba više podzemnih skladišta, što daje optimizam za budućnost struka koje su se do sad fokusirale na istraživanje i eksploataciju nafte i plina, tj. garantira sigurnost tih struka, uz adaptaciju i u nekim segmentima prekvalifikaciju prema specifičnostima novih primijenjenih tehnologija.

10 LITERATURA

1. MATOS, C. R., CARNEIRO, J. F., & SILVA, P. P. (2019). Overview of large-scale underground energy storage technologies for integration of renewable energies and criteria for reservoir identification. *Journal of Energy Storage*, 21, 241-258.
2. MOLIKOVA, A., VÍTĚZOVÁ, M., VÍTĚZ, T., BURIANKOVA, I., HUBER, H., DENGLER, L., ... & URBANOVÁ, I. (2022). Underground gas storage as a promising natural methane bioreactor and reservoir?. *Journal of Energy Storage*, 47, 103631.
3. ZIVAR, D., KUMAR, S., & FOROOZESH, J. (2021). Underground hydrogen storage: A comprehensive review. *International journal of hydrogen energy*, 46(45), 23436-23462.
4. BECKMAN, K. L., DETERMEYER, P. L., & MOWREY, E. H. (1995). *Natural gas storage: Historical development and expected evolution. Final report, December 1994-February 1995* (No. PB-95-249900/XAB). International Gas Consulting, Inc., Houston, TX (United States).
5. TARKOWSKI, R. (2019). Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 86-94.
6. THEMA, M., WEIDLICH, T., HÖRL, M., BELLACK, A., MÖRS, F., HACKL, F., KOHLMAYER, M., GLEICH, J., STABENAU, C., TRABOLD, T., NEUBERT, M., ORTLO, F., BROTSACK, R., SCHMACK, D., HUBER, H., HAFENBRADL, D., KARL, J., STERNER, M. (2019). Biological CO₂-methanation: an approach to standardization. *Energies*, 12(9), 1670.
7. LORD, A. S. (2009). *Overview of geologic storage of natural gas with an emphasis on assessing the feasibility of storing hydrogen* (No. SAND2009-5878). Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States).
8. CAGLAYAN, D. G., WEBER, N., HEINRICHS, H. U., LINßEN, J., ROBINIUS, M., KUKLA, P. A., & STOLTEN, D. (2020). Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(11), 6793-6805.
9. European Commission, 2030 climate & energy framework, 2022, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en (9.9.2022.)
10. Environmental and Energy Study Institute, Fossil Fuels, 2021, <https://www.eesi.org/topics/fossil-fuels/description> (9.9.2022.)
11. PUJADES, E., ORBAN, P., BODEUX, S., ARCHAMBEAU, P., ERPICUM, S., & DASSARGUES, A. (2017). Underground pumped storage hydropower plants using open pit mines: How do groundwater exchanges influence the efficiency?. *Applied Energy*, 190, 135-146.

12. KRONIGER, D., & MADLENER, R. (2014). Hydrogen storage for wind parks: A real options evaluation for an optimal investment in more flexibility. *Applied energy*, 136, 931-946.

13. QURESHI, W. A., NAIR, N. K. C., & FARID, M. M. (2011). Impact of energy storage in buildings on electricity demand side management. *Energy conversion and management*, 52(5), 2110-2120.

14. NORDELL, B. (2012). UNDERGROUND THERMAL ENERGY STORAGE (UTES). In *International Conference on Energy Storage: 16/05/2012-18/05/2012*.

15. DICKINSON, J. S., BUIK, N., MATTHEWS, M. C., & SNIJDERS, A. (2009). Aquifer thermal energy storage: theoretical and operational analysis. *Geotechnique*, 59(3), 249-260.

16. SUCCAR, S., & WILLIAMS, R. H. (2008). Compressed air energy storage: theory, resources, and applications for wind power. *Princeton environmental institute report*, 8, 81.

17. Energy Storage Association, ESA, Compressed Air Energy Storage, 2018b, <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/mechanical-energy-storage/> (20.9.2022.)

18. Energy Storage Association, ESA, Underground Hydrogen Storage, 2018a, <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/hydrogen-energy-storage/> (16.9.2022.)

19. WILLIAMS, J. D., WILLIAMSON, J. P., PARKES, D., EVANS, D. J., KIRK, K. L., SUNNY, N., ... & AKHURST, M. C. (2022). Does the United Kingdom have sufficient geological storage capacity to support a hydrogen economy? Estimating the salt cavern storage potential of bedded halite formations. *Journal of Energy Storage*, 53, 105109.

[a] Energy Storage News, Colthorpe, Andy (April 16, 2021). "Advanced compressed air energy storage project gets funding help from Canadian government". <https://www.energy-storage.news/advanced-compressed-air-energy-storage-project-gets-funding-help-from-canadian-government/> (2.5.2023.)

[b] - Energy Storage News, Colthorpe, Andy (June 1, 2022). "China's compressed air energy storage industry makes progress". <https://www.energy-storage.news/chinas-compressed-air-energy-storage-industry-makes-progress/> (2.5.2023.)

[c] The Physics Factbook, <https://hypertextbook.com/facts/2005/MichelleFung.shtml> (2.5.2023.)

[d] Podzemno skladište plina, Kapaciteti skladišta, <https://www.psp.hr/> (3.5.2023.)

[e] Podzemno skladište plina, Kapaciteti skladišta plina Okoli, <https://www.psp.hr/hr/poslovanje/o-skladistenju-plina/kapaciteti-skladista-plina-okoli/1161> (3.5.2023.)

[f] Wikipedia, 2023, "Fengning Pumped Storage Power Station", https://en.wikipedia.org/wiki/Fengning_Pumped_Storage_Power_Station (3.5.2023.)

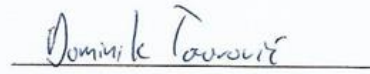
[g] Wikipedia, 2023, Aquifer thermal energy storage ,
https://en.wikipedia.org/wiki/Aquifer_thermal_energy_storage (3.5.2023.)

[h] Skarphagen, H., Banks, D., Frengstad, B. S., & Gether, H. (2019). Design considerations for borehole thermal energy storage (BTES): A review with emphasis on convective heat transfer. *Geofluids*, 2019.

[i] Vantaan energia, World's largest cavern thermal energy storage to be built in Vantaa,
<https://www.vantaanenergia.fi/en/we/carbon-negativity-2030/worlds-largest-cavern-thermal-energy-storage-to-be-built-in-vantaa/> (3.5.2023.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.



Dominik Tovarović



KLASA: 602-01/23-01/50
URBROJ: 251-70-12-23-2
U Zagrebu, 29.05.2023.

Dominik Tovarović, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/50, URBROJ: 251-70-12-23-1 od 04.04.2023. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

Korištenje geoloških formacija za skladištenje različitih oblika energije

Za mentora ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada prof. dr. sc. Domagoj Vulin nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

prof. dr. sc. Domagoj Vulin

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)