

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



***Istraživanje puteva energetske tranzicije -
međuvodnost "power-to-X" tehnologija,
tehnologija odgovora potrošnje i povezivanja tržišta
energijom – INTERENERGY***

***D1.2 – Pregled dostupnih tehnologija za odgovor
potrošnje na makro razini***

Zagreb, 2020. godina

Projektni tim:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Prof. dr. sc. Ingo Stadler

Prof. dr. sc. Henrik Lund

Izv. prof. dr. sc. Iva Ridjan Skov

Prof. dr. sc. Fei Wang

Antun Pfeifer, mag. ing. mech.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. Sustavi pohrane energije.....	4
2.1. Mehanički sustavi pohrane energije.....	4
2.1.1. Zamašnjaci	4
2.1.2. Sustav pohrane energije u obliku stlačenog zraka	7
2.1.3. Sustav pohrane energije u obliku stlačenog CO ₂	8
2.1.4. Sustav pohrane energije u ukapljenom zraku	9
2.1.5. Gravitacijska pohrana	10
2.1.6. Reverzibilne hidroelektrane	13
2.2. Kemijska pohrana	15
2.3. Pohrana energije u vodik.....	16
2.3.1. Izdvajanje ugljikovog dioksida CO ₂	20
2.3.2. Sintetska goriva.....	23
2.3.3. Proizvodnja amonijaka.....	26
2.4. Toplinska pohrana energije	27
2.5. Električna pohrana energije	34
2.6. Pohrana energije putem supravodiča	35
2.7. Elektro kemijska pohrana energije.....	35
2.7.1. Litij-ionske baterije	37
2.7.2. Vanadij-redoks baterije	39
2.7.3. Na-S baterije	40
2.7.4. Na-NiCl ₂ baterije.....	41
3. Sustavi desalinizacije.....	43

POPIS SLIKA

Slika 1. Sustavi pohrane energije [1]	1
Slika 2. Prikladnost tehnologija za promatrane uloge [2]	3
Slika 3. Shema zamašnjaka [3]	4
Slika 4. geometrija rotora [3]	5
Slika 5. Odgovor potrošnje zamašnjaka [8]	6
Slika 6. Shema CAES sustava [11]	8
Slika 7. Sustav pohrane energije u stlačenom CO ₂ [14]	9
Slika 8. Shematski prikaz LAES sustava [17].....	10
Slika 9. gravitacijska pohrana energije [13].....	10
Slika 10. ARES sustav [13].....	11
Slika 11. Gravitacijska pohrana energije [19].....	12
Slika 12. Shema reverzibilne hidroelektrane [24].....	14
Slika 13. Utjecaj reverzibilne hidroelektrane na opterećenje mreže [26]	15
Slika 14. Utjecaj dinamičnih cijena [26].....	15
Slika 15. Povećanje snage elektrolizatora od 25 do 100 % nazivne snage [27].	16
Slika 16. Smanjenje snage elektrolizatora od 100 do 25 % nazivne snage [27].....	16
Slika 17. Balansiranje mreže tokom kvarova u sustavu [27]	17
Slika 18. Učinkovitost elektrolizatora [31]	18
Slika 19. Vrste pohrane vodika [34].....	19
Slika 20. Utrošak energije na kompresiju vodika [35].....	20
Slika 21. Tehnologije hvatanja ugljika [34]	21
Slika 22. Proces absorpcije CO ₂ [39]	21
Slika 23. Membranska separacija [39]	22
Slika 24. Kriogena separacija [39]	22
Slika 25. Shema procesa izravnog hvatanja ugljika DACCS [41]	23
Slika 26. Sabatierov proces [42]	24
Slika 27. Priprema vodika i sintetskih goriva [43].....	25
Slika 28. Smanjenje CEEP-a pod utjecajem uvođenja proizvodnje sintetskog plina [44].....	25
Slika 29. Ukinkovitost Sabatier-ove reakcije [45]	26
Slika 30. Proces proizvodnje amonijaka Haber-Boschovim postupkom [47]	26
Slika 31. Trošak sustava proizvodnje amonijaka NH ₃ [32]	27
Slika 32. Akumulator topline, TE-TO Zagreb [49].....	28
Slika 33. Povezanost sektora uz uvođenje P2H tehnologije [48].....	29
Slika 34. Utjecaj uvođenja P2H na CEEP [52]	29
Slika 35. Pohrana toplinske energije [55]	31
Slika 36. Pohrana u vrućim stjenama	33
Slika 37. Sustav visokotemperaturne pohrane u sloju kamena	33
Slika 38. Sustav visokotemperaturne pohrane u sloju kamena	34
Slika 39. Rad kondenzatorskog sustava pohrane energije [61].....	34
Slika 40. Uloga baterijskih sustava pohrane energije [62].....	35
Slika 41. Utjecaj uvođenja baterijske pohrane na krivulju opterećenja energetskog sustava [62]	36
Slika 42. Shematski prikaz procesa Litij – ionskih baterija [2]	37
Slika 43. Projekcija cijena litij ionskih baterija [2].....	38
Slika 44. Samopražnjenje baterijskog sustava pohrane energije.....	39
Slika 45. Vanadij-redoks baterija [2]	39
Slika 46. Na-S baterija	40

Slika 47. Shematski prikaz	41
Slika 48. shematski prikaz Na-NiCl ₂ baterije.....	42
Slika 49. Procesi desalinizacije [67]	43
Slika 50. termalni princip desalinizacije [68].....	44
Slika 51. Desalinizacija procesom kompresije para [69]	44
Slika 52. Princip osmoze [70]	45
Slika 53. Sustav povratne osmoze [71]	46
Slika 54. Opterećenje sustava pripreme pitke vode, slučaj 1 (a) i slučaj 2 (b) [72].....	46
Slika 55. Proces desalinizacije te mogućnosti promjene opterećenja postrojenja u smislu pružanja usluga odgovora potrošnje [72]	47

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste i namjene pohrane energije u mrežnim sustavima pohrane i kućnim sustavima [2]	2
Tablica 2. Karakteristike materijala korištenih u FES [4].....	6
Tablica 3. Financijski podaci o zamašnjacima [2]	6
Tablica 4. Podaci o sustavu pohrane energije putem stlačenog zraka	7
Tablica 5. financijski podaci o CAES sustavima [11]	8
Tablica 6. Podaci o sustavu [13]	11
Tablica 7. Podaci o sustavu gravitacijske pohrane energije [19], [20]	12
Tablica 8. Podaci o tehnologiji [25]	14
Tablica 9. Dinamičke karakteristike elektrolizatora [28].....	17
Tablica 10. Učinkovitost i investicijski troškovi elektrolizatora [32].....	18
Tablica 11. Financijski podaci o pohrani vodika [33].....	19
Tablica 12. Potrebni parametri kod izdvajanja CO ₂ [39]	22
Tablica 13. Fleksibilnost pojedinih aspekta sustava hvatanja CO ₂ [40].....	23
Tablica 14. Investicijski troškovi u postrojenje za proizvodnju sintetskih goriva iz vodika i ugljikovog dioksida [46]	26
Tablica 15. Trošak dizalica topline, električnih kotlova i spremnika topline [53], [2].....	29
Tablica 16. Podaci o visokotemperaturnoj pohrani toplinske energije [56]	31
Tablica 17. Podaci o korištenim rastaljenim solima u sustavima visokotemperaturne pohrane [54]	32
Tablica 18. Podaci o vrstama litij ionskih baterija [2]	38
Tablica 19. Financijski podaci [2].....	40
Tablica 20. Financijski podaci [2].....	41
Tablica 21. Investicijski podaci o bateriji [2].....	42
Tablica 22. Financijski osvrt na uvođenje odgovora potrošnje u postrojenjima desalinizacije, [72]	47
Tablica 23. Utrošak energije različitih sustava desalinizacije, [73]	48

SAŽETAK

Energetski sustavi u tranziciji od proizvodnje temeljene na fosilnim gorivima i centraliziranoj proizvodnji, s visokim emisijama stakleničkih plinova, prema nisko-ugljičnim sustave koji se temelje na promjenjivoj i distribuiranoj obnovljivoj energiji, prolaze kroz različite faze transformacije. U prvim fazama podizanje integracije promjenjivih obnovljivih izvora energije (OIE) može se izvesti u većini konfiguracija energetskeg sustava bez implementacije dodatnih tehnologija skladištenja i pretvorbe. U kasnijim fazama, s visokim udjelom varijabilnih OIE, potrebne su sinergije s drugim sustavima kako bi se integrirala najjeftinija i održiva energija. Ovaj projekt bavi se međuodnosima između različitih tehnologija odgovora potrošnje, sektora potrošnje i povezivanja tržišta električnom energijom u energetskej tranziciji. Uloga tih tehnologija istražuje se iz konteksta tržišnog povezivanja, koje je već u tijeku u Europskej uniji. U ovom istraživanju, ključno istraživačko pitanje je uravnotežena integracija različitih tehnologija za odgovor potrošnje i “power-to-X” te potrošnje, određivanje njihove optimalne mješavine i izbjegavanje nepotrebnih tehnoloških zaključavanja (“lock-in”). Kako bi se to postiglo, napraviti će se novi moduli za modeliranje ponašanja power-to-X i tehnologija odgovora potrošnje. Također, razraditi će se tržišta takvih tehnologija u nastajanju kao i poslovni modeli za njihovu integraciju. To je važan korak u digitalizaciji energetskeg sustava i korištenju sinergija kako bi se dekarboniziralo integrirani energetskej sustav.

U radnom paketu Prikupljanje najnovijih i relevantnih podataka, prikuplja se informacije i materijale o „power-to-X“ tehnologijama i tehnologijama za odgovor potrošnje, korištenjem rezultata prethodnih projekata provedenih od strane istraživačke grupe, a posebno projekta RESFLEX koji je financirala Hrvatska zaklada za znanost i koji je uspješno završen 2019. godine. Također, suradnja sa suradnicima na projektu koristi se za prikupljanje najnovijih i relevantnih podataka iz ostatka EU-a i iz Kine.

U ovom pregledu, obrađuje se stanje i napredak primjene tehnologija za odgovor potrošnje koje se mogu primijeniti na razini elektroenergetske mreže. Stoga je ovdje fokus stavljen na veće sustave i njihovu interakciju. Prikupljali su se podaci o tehnologiji koja se koristi ili tek ulazi u faze istraživanja, a pruža značajan potencijal povezivanju sektora, fleksibilizaciji sustava te integraciji obnovljivih izvora energije. Prikupljali su se podaci o pogonskim značajkama navedenih sustava, raspoloživosti te procijenjenim troškovima.

SUMMARY

Energy systems in the transition from fossil-based and centralized production, with high GHG emissions, to low-carbon systems based on variable and distributed renewable energy, pass through different phases of transformation. In the first phases, raise of integration of variable renewable energy sources (RES) can be performed in most of energy system configurations without the implementation of additional storage and conversion technologies. In later stages, with a high share of variable RES in the mix, synergies with other systems are needed to integrate the cheapest and sustainable energy. This project deals with interrelation between different power-to-x and demand response technologies and market coupling in the energy transition. Role of these technologies is investigated from the context of market coupling, which is already underway in the European Union. In this research, the key question which is addressed is the balanced integration of different power-to-X and demand response technologies, determining their optimal mix and avoiding unnecessary technological lock-ins. In order to achieve this, new modules will be created to model the behaviour of power-to-X and demand response technologies. Also, emerging markets for such technologies will be elaborated as well as business models for their integration. This is an important step in the digitalization of the energy system and employing the synergies in order to decarbonize multiple systems.

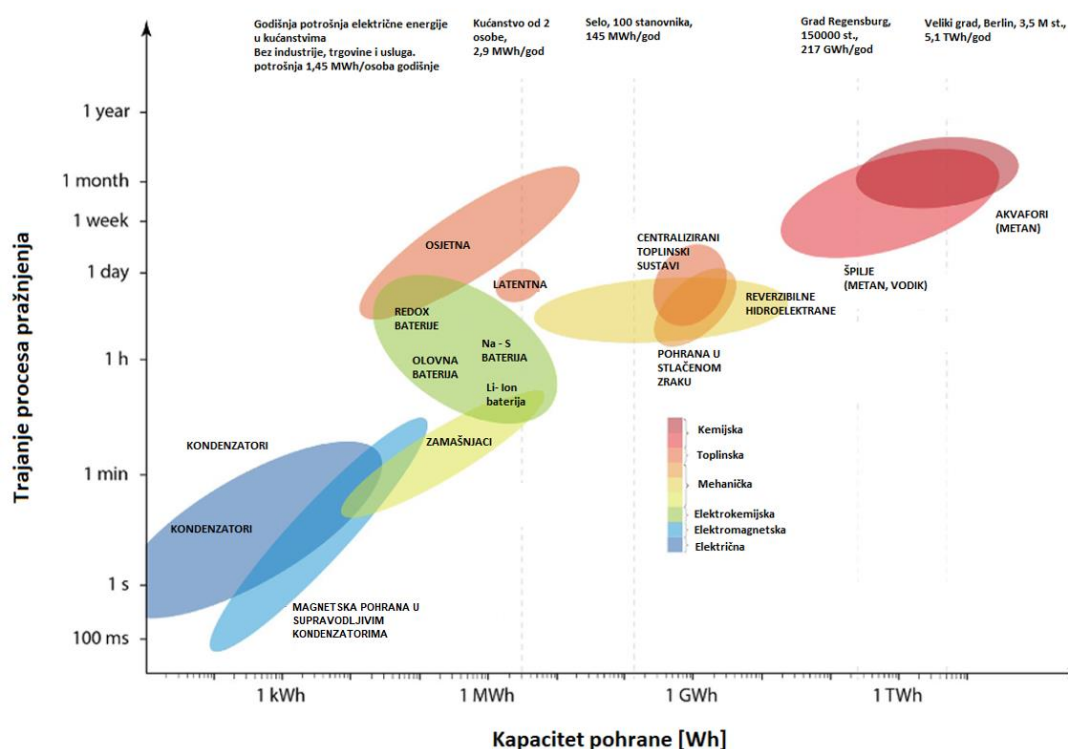
In the work package Collecting the latest and relevant data, information and materials on "power-to-X" and response technologies are collected, using the results of previous projects conducted by the research group, especially the RESFLEX project funded by the Croatian Science Foundation. and which was successfully completed in 2019. Also, collaboration with project contributors is used to collect up-to-date and relevant data from the rest of the EU and from China.

In this review, the state and progress of the application of demand response technologies that can be applied at the level of the distribution electricity network are discussed. Such technologies are available in households and smaller units, industry and services up to the level of public buildings. Conceptual research and data on availability, type, estimated costs and their potential aggregation were collected. All technologies available on the market are described and some promising new concepts included in the review.

1. UVOD

Pohrana energije i odgovor potrošnje na makro razini podrazumijeva sve tehnologije odziva potrošnje iznad razine kućanstva i usluga na distribucijskoj mreži. Slika 1. prikazuje sustave pohrane energije. Upravo su tehnologije pohrane energije prilike za uvođenje odgovora potrošnje uslijed mogućnosti utroška i povratka energije u sustav. Druga vrsta tehnologija koje mogu pružiti odgovor potrošnje su potrošači sa mogućnošću reguliranja potrošnje. Sama regulacija potrošnje za sebe ne predstavlja osobitu prednost ukoliko ostatak sustava ne može povoljno podnijeti promjene u režimu rada.

Razmatrane tehnologije moraju izravno ili uz posredovanje druge tehnologije pružiti mogućnost povezivanja sektora proizvodnje energije te potrošača uz istovremenu implementaciju povratnih veza.



Slika 1. Sustavi pohrane energije [1]

Proizvodnja električne energije iz varijabilnih izvora često ne prati uhodane režime potrošnje. Iz tog razloga se uvode tehnologije koje mogu pružiti zadovoljenje energetske potrebe u slučaju različite proizvodnje i potrošnje. Tu ulogu mogu preuzeti primjerice baterijski sustavi pohrane energije kako bi isporučili energiju u nedostatku proizvodnje. U slučaju prekomjerne proizvodnje se sustav automatski optimizira na način da uključi određene potrošače kako bi iskoristio svu raspoloživu energiju ili je pohranio za kasnije korištenje.

Pohrana energije se može podijeliti na tehnologije korištene na lokalnoj razini te na razini sustava. Tablica 1. prikazuje podjelu prema korištenoj razini [2]. Većina razlika proizlazi iz veličine sustava pohrane, a time i instalirane snage kojom sustav može sudjelovati na tržištu električne energije.

Tablica 1. Vrste i namjene pohrane energije u mrežnim sustavima pohrane i kućnim sustavima [2]

	Namjena		
		Razina elektroenergetskog sustav	Lokala razina
Oblik pohrane	Električna energija	Zamašnjaci Velike baterije (NaS, VRB, SoNick) Stacionarne litij ionske baterije	Olovne baterije Zamašnjaci Stacionarne litij ionske baterije Baterije električnih vozila
	Toplinska energija	Sezonska pohrana toplinske energije Podzemna pohrana toplinske energije Pohrana u velikim spremnicima	Mali spremnici vruće vode
	Plin	Podzemna skladišta plina Spremanje vodika u spremnicima te ispod zemlje	Pohrana stlačenog vodika

Prikladnost tehnologije u svrhu pohrane električne energije i pružanja usluga odgovora potrošnje se može opisati putem sljedećih veličina.

1. Vremensko izmicanje potrošnje – električna energija se kupuje i skladišti u vrijeme niskih cijena na tržištu električne energije. Periodi niskih cijena se događaju u vremenima istovremene niske potrošnje, ali i visoke proizvodnje električne energije većinom uvjetovane varijabilnosti u proizvodnji iz varijabilnih obnovljivih izvora energije. Također, provodi se smanjenje vršnih opterećenja sustava, a time se izbjegavaju ulaganja u dodatna proizvodna postrojenja te njihov rad.
2. Promjena vremena potrošnje i potrošnja vlastite energije – primjenjivo kod potrošača s vlastitom proizvodnjom, a cilj ove mjere je potaknuti preklapanje potrošnje i proizvodnje vlastite električne energije te na taj način smanjiti zagušenje mreže.
3. Kompenzacija varijacija u proizvodnji iz VOIE
4. Optimizacija rada mreže i odgoda ulaganja – odgađanje potrebe za izgradnjom dodatnih kapaciteta i smanjenje CEEP-a
5. Usluga primarne regulacije frekvencije – odgovor generatora unutar 15 do 30 sekunda od poremećaja
6. Usluga sekundarne regulacije frekvencije – odgovor generatora unutar 15 minuta
7. Usluga tercijarne regulacije frekvencije – odgovor generatora unutar 15 minuta i zamjenjuje primarnu i sekundarnu regulaciju
8. Hladni start – početak rada generatora u vrijeme potpunog kolapsa električne mreže. Samo sustavi koji ne zahtijevaju dodatnu energiju izvana za početak rada mogu pružiti ovu uslugu.
9. Regulacija napona – mogućnost regulacije napona i reaktivne snage u određenim dijelovima sustava
10. Osiguravanje kvalitete karakteristika električne energije – regulacija napona, kompenzacija utjecaja pojava kao što su harmonici i kompenzacija lokalnih vršnih opterećenja na razini nekoliko sekunda

Namjena	Hydro	CAES	NaS	NaNiCl	Li-Ion	Redox	Fly-wheel
Vremensko izmicanje potrošnje	●	●	●	●	●	●	●
Promjena vremena potrošnje i potrošnja vlastite energije	●	●	●	●	●	●	●
Kompenzacija varijacija u proizvodnji iz VOIE	●	●	●	●	●	●	●
Optimizacija rada mreže i odgoda ulaganja	●	●	●	●	●	●	●
Usluga primarne regulacije	●	●	●	●	●	●	●
Usluga sekundarne regulacije	●	●	●	●	●	●	●
Usluga tercijarne regulacije	●	●	●	●	●	●	●
Hladni start	●	●	●	●	●	●	●
Regulacija napona	●	●	●	●	●	●	●
Osiguravanje kvalitete karakteristika električne energije	●	●	●	●	●	●	●

Legenda:



Prikladno



Manje prikladno



Neprikladno

Slika 2. Prikladnost tehnologija za promatrane uloge [2]

Odgoda i regulacija potrošnje podrazumijeva modifikacije u radu postojećih sustava kako bi se omogućila implementacija odgovora potrošnje. Ova vrsta odgovora potrošnje je najprimjenjivija u velikim potrošačima kao što su postrojenja za obradu voda i otpadnih voda, desalinizacijska postrojenja te prikladni industrijski procesi.

Dio tehnologija odgovora potrošnje koji se odnosi na mikro razinu je obrađen u izvještaju „D.1.1. Pregled dostupnih tehnologija za odgovor potrošnje na mikro razini“.

2. Sustavi pohrane energije

Jedan od načina postizanja fleksibilnosti elektro-energetskog sustava i omogućavanja tehnologija odgovora potrošnje je uz uvođenje sustava pohrane energije. Sustavi pohrane energije omogućuju odvajanje krute veze istovremenosti potrošnje i proizvodnje. Uvođenje navedene spone je značajno u uvjetima varijabilne proizvodnje električne energije i uz zahtjev što većeg iskorištenja dostupne energije iz varijabilnih izvora energije.

2.1. Mehanički sustavi pohrane energije

Pohrana energije u mehaničkom obliku podrazumijeva baratanje kinetičkom, potencijalnom ili nekom od kombinacija navedenih oblika energije.

2.1.1. Zamašnjaci

Zamašnjaci se sastoje od rotora, motora/generatora, ležajeva, upravljačke elektronike i kućišta. Slika 3. prikazuje osnovnu shemu zamašnjaka. Rotor se rotira unutar kućišta te je uskladištena energija zapravo kinetička energija uslijed rotacije mase. Kontakt rotora s ostatkom sustava je potencijalni izvor trenja te gubitka energije te se iz tog razloga velika pažnja posvećuje eliminaciji tog izvora gubitaka. Jedan od korištenih načina je primjena magnetske levitacije rotora unutar kućišta.

Količina energije koju je moguće uskladištiti putem zamašnjaka ovisi o obliku rotora i njegovom materijalu. Stoga se dolazi do linearne proporcionalnosti s momentom inercije rotora te kvadratom kutne brzine vrtnje.

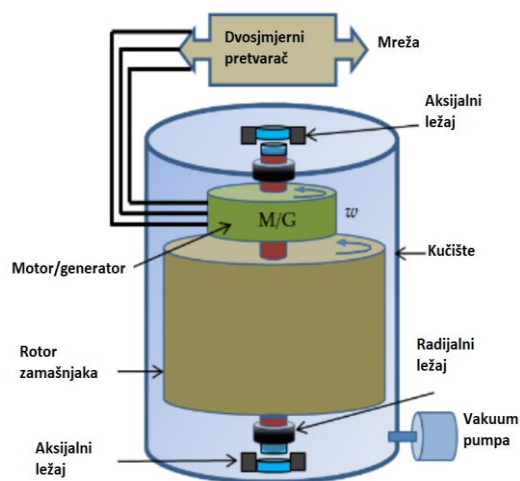
$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Gdje je:

- E – ukupna uskladištena kinetička energija [J]

- I – moment inercije rotora [kgm^2]

- ω – kutna brzina



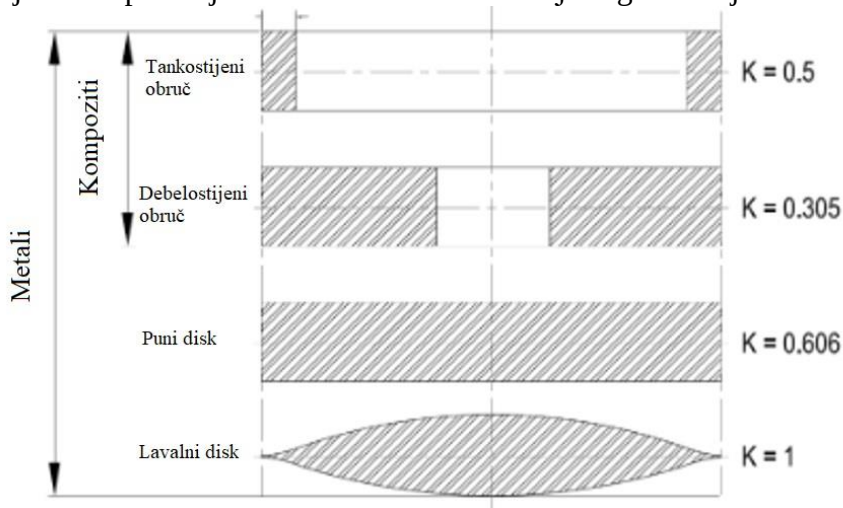
Slika 3. Shema zamašnjaka [3]

Ipak, korisna energija se razlikuje od ukupno uskladištene ponajviše zbog ograničenja brzine pri kojoj je moguća transformacija rotacijske u električnu energiju uslijed ograničenja električne opreme.

Time se dolazi do izraza za korisnu energiju:

$$E = \frac{1}{2} I (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2)$$

Gdje ω_{max} i ω_{min} označavaju maksimalnu te minimalnu kutnu brzinu unutar koje sustav radi. Dolazi do potrebe omogućavanja rada u što većem rasponu kutnih brzina. Maksimalna brzina ovisi o dozvoljenim naprežanjima unutar rotora na što utječe geometrija i materijal rotora.



Slika 4. geometrija rotora [3]

Karakteristike pohrane u zamašnjacima:

- Dug životni vijek, više od 20 godina
- Velik broj ciklusa punjenja i pražnjenja (stotine tisuća)
- Brz odziv
- Visoke snage punjenja i pražnjenja
- Visoka učinkovitost – 90 do 95 %
- Visoka gustoća energije i snage
- Nizak utjecaj na okoliš jer se ne koriste teško probavljivi materijali
- Niski troškovi rada i održavanja
- Nema utjecaja vanjskih faktora kao temperature na rad sustava
- Snaga i kapacitet sustava nisu povezani te mogu biti optimizirani u odnosu na namjenu. Snaga ovisi o snazi motora/generatora, dok kapacitet ovisi o karakteristikama i brzini vrtnje rotora.

Mane sustava pohrane energije u zamašnjacima su visoki gubici energije kao funkcija vremena. Zbog tog razloga nisu pogodni kao pohrana na dulje vremenske periode. Također, može doći do problema sa sigurnosti uslijed mogućih grešaka u izradi ili konstruiranju. Tablica 2. prikazuje karakteristike materijala korištenih za izradu rotora zamašnjaka. Teoretske energetske gustoće sežu sve do 780 Wh/kg. Potrebno je primijetiti da veće gustoće energije pripadaju rotorima od sintetskih materijala u usporedbi s čelikom. Također, postoji manja opasnost od opasne havarije zamašnjaka s rotorom od sintetskih materijala jer ne dolazi do iznenadne katastrofalne havarije, već postupene delaminacije vanjskih dijelova rotora [4].

Tablica 2. Karakteristike materijala korištenih u FES [4]

Materijal rotora	Vlačna čvrstoća	Gustoća	Mogućnost pohrane energije
	σ_m	ρ	E_{sp}
	GPa	kg/m ³	Wh/kg
E-staklo	3,5	2540	190
S-staklo	4,8	2520	265
Kevlar	3,8	1450	370
Spectra 1000	3,0	970	430
T-700 grafit	7,0	1780	545
T-1000 grafit	10,0	-	780
Manganski čelik	2,7	8000	47

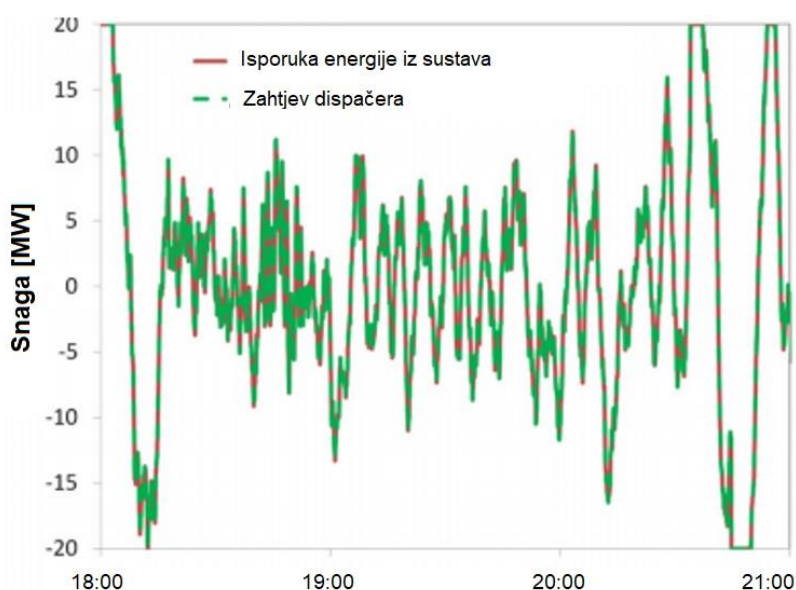
Trenutno se sustavi pohrane energije u zamašnjacima koriste u svrhu balansiranja mreže te regulacije frekvencije i napona mreže [5], [3]. Kod rada s varijabilnim izvorima energije, zamašnjaci mogu uslijed visokih brzina pohrane i pražnjenja sudjelovati u ispravljanju varijacija u proizvodnji. Također, moguć je rad zajedno s baterijskim sustavima pohrane kako bi se ograničile maksimalne snage punjenja i pražnjenja baterija te time osigurao dulji radni život baterijskog sustava [6].

Ovaj sustav pohrane energije može pružiti vrlo brz odgovor potrošnje na razini od 3 ms čime se postižu oko 10 puta brže reakcije od baterija.

Slika prikazuje vrlo brze promjene snage punjenja ili pražnjenja sustava u skladu s zahtjevima operatora koje sustav u potpunosti ispunjava.

Tablica 3. Financijski podaci o zamašnjacima [2]

Godina		2015	2020	2030	2050
Investicija	M€/MW	0,164	0,145	0,136	0,131
Investicija	M€/MWh	1	0,335	0,335	0,335
LCOS	€/MWh		342 - 555		



Slika 5. Odgovor potrošnje zamašnjaka [8]

Nivelirani trošak pohrane energije u zamašnjacima se kreće između 342 i 555 \$/MWh u ovisnosti o veličini i specifikacijama sustava [7].

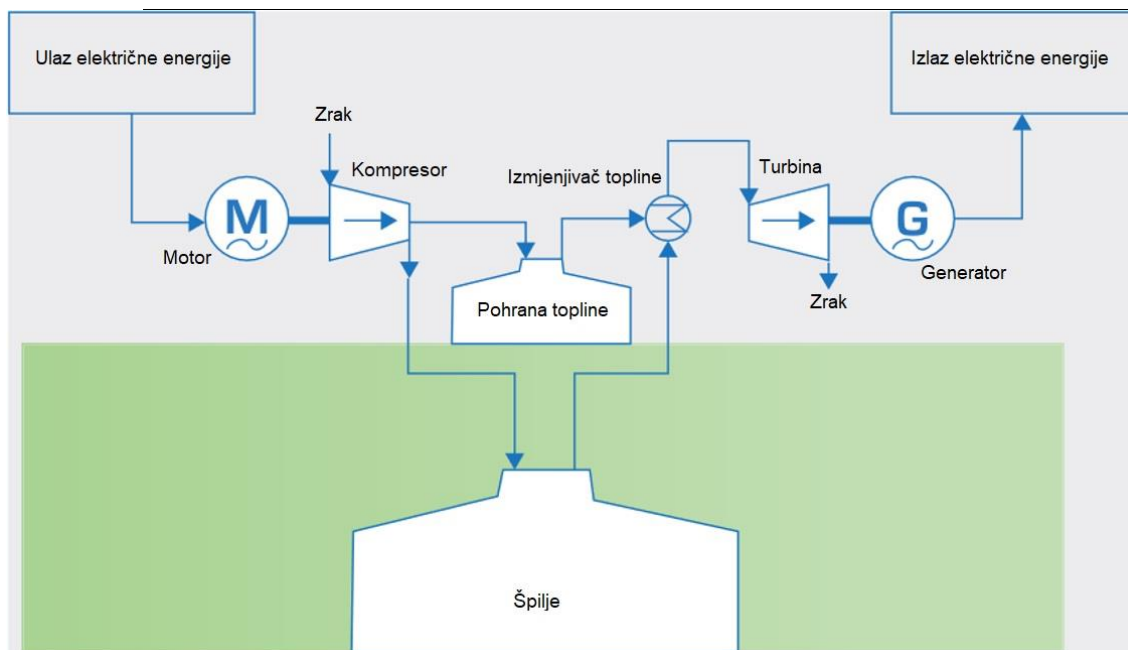
2.1.2. Sustav pohrane energije u obliku stlačenog zraka

Pohrana energije u obliku stlačenog zraka (engl: „*Compressed air energy storage*“ – CAES) se odvija na način da se koristi kompresor koji može biti u sklopu termoeenergetskog postrojenja te tlači zrak na tlak do 100 bar. Stlačeni zrak se pohranjuje za kasniju upotrebu. Tokom procesa kompresije dolazi i do zagrijavanja zraka. Zbog toga se zrak provodi kroz izmjenjivač topline gdje predaje toplinu koja se također skladišti u nekom od sustava visokotemperaturne pohrane topline. Skladištenje se može odvijati u spremnicima ili podzemnim špiljama. Tokom ispuštanja stlačenog zraka kroz turbinu dolazi do pada temperature što nepovoljno djeluje na rad sustava. Iz tog razloga se često u ovoj vrsti sustava koristio dodatan izvor topline koji predgrijava stlačeni zrak prije dolaska do turbine. Isti zadatak se može riješiti korištenjem otpadne topline kompresije zasebno uskladištene [7],[9]. sustav shematski prikazuje Slika 6.

Učinkovitost sustava se kreće oko 70 % [7], spremanje energije čak i na period više od godinu dana je moguće [9], a brzina pokretanja se kreće unutar nekoliko minuta [7]. Učinkovitost sustava pohrane je ovisna o učinkovitosti kompresora, toplinskim gubitcima kod pohrane energije te o učinkovitosti turbine. Učinkovitost može dostići do 70 %, ali uz napomenu da se u tom slučaju radi o naprednim adijabatskim sustavima. Kod starijih sustava se ipak dolazi do učinkovitosti od 40 %. Gustoća energije iznosi 2 do 20 kWh/m³ čime se dolazi do potrebe za velikim skladištenim volumenima potrebnih za pohranu značajne količine energije. Nivelirani trošak pohrane energije iznosi između 116 i 140 \$/MWh [10].

Tablica 4. Podaci o sustavu pohrane energije putem stlačenog zraka

Veličina	Iznos	Jedinica
Učinkovitost	70	%
Životni vijek	30	Godina
Brzina pokretanja	Red veličine	Minuta
Kapacitet	0,1 – 10	GWh
Snaga	Red veličine 100	MW
Duljina pohrane energije	>1	Godina
LCOS	116 - 140	€/MWh



Slika 6. Shema CAES sustava [11]

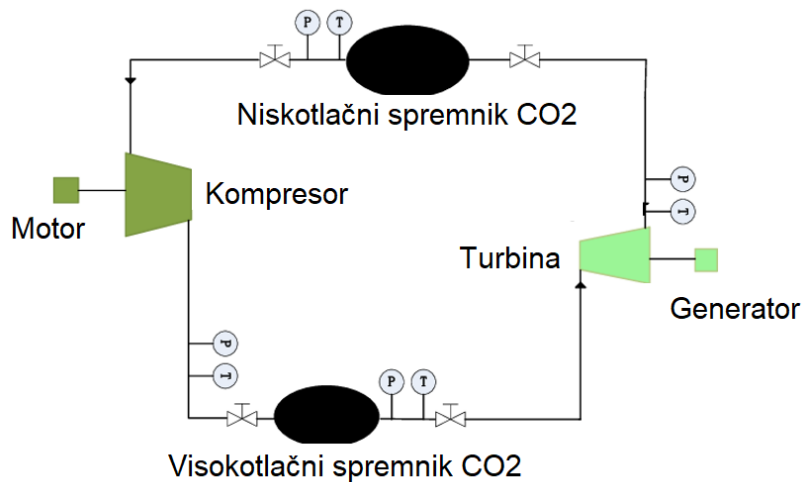
Tablica 5. financijski podaci o CAES sustavima [11]

Godina	Jedinica	2015	2020	2030	2050
Investicija	M€/MW	0,64	0,64	0,64	0,64
Investicija	M€/MWh	0,65	0,65	1	0,8

Iako s ekonomske strane povoljan, CAES nije uvelike zastupljen uz činjenicu da trenutno postoje samo dva postrojenja ukupnog kapaciteta 500 MW dok je u razvoju 3 GW kapaciteta. Razlog niskoj zastupljenosti leži u izrazito specifičnim zahtjevima koji trebaju biti zadovoljeni na lokaciji instalacije, posebice s naglaskom na dovoljno veliko podzemno spremište također dovoljnih karakteristika [12].

2.1.3. Sustav pohrane energije u obliku stlačenog CO₂

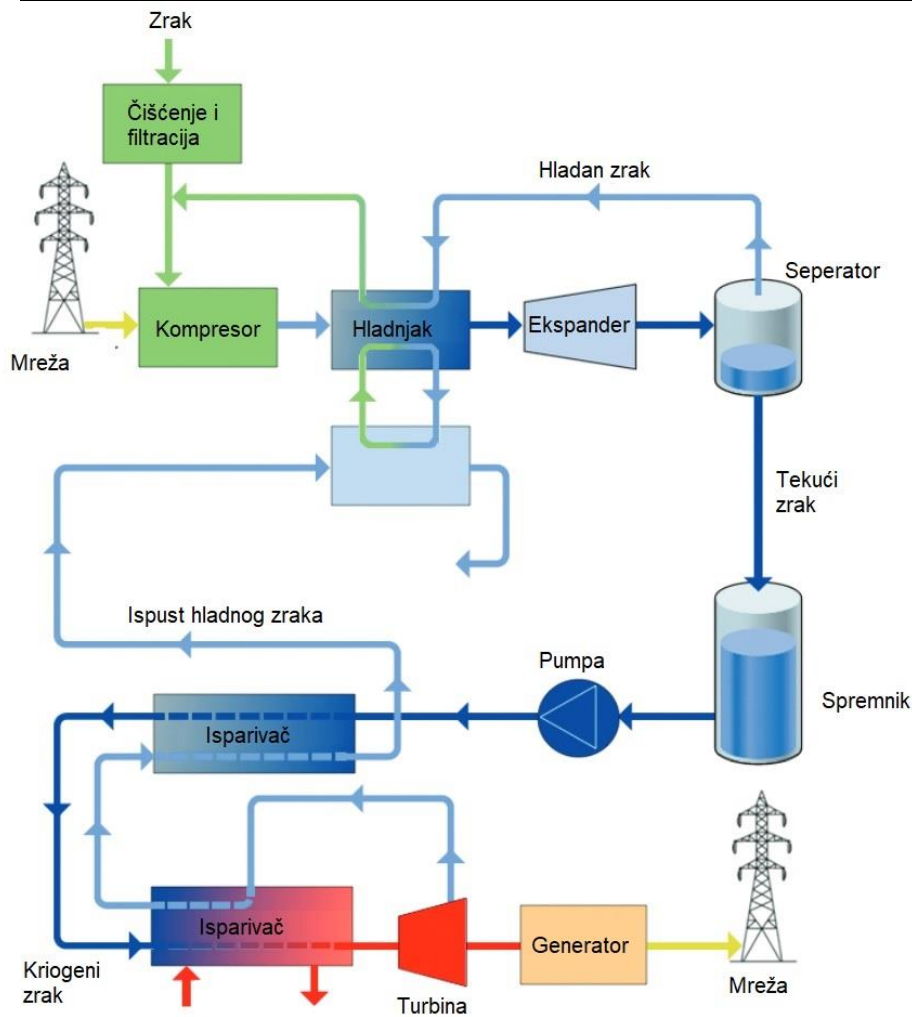
Ovaj sustav pohrane energije radi na jednak način kao i sustav sa stlačenim zrakom. Razlika je u korištenom mediju. CO₂ omogućuje potrebu za manjim volumenom pohrane uz postizanje iste količine pohranjene energije kao sustav sa stlačenim zrakom. Gustoća pohrane energije korištenjem CO₂ iznosi između 250 i 500 kWh/m³ u usporedbi s 2 do 20 kWh/m³ kod korištenja stlačenog zraka [13]. CO₂ se zadržava u zatvorenom radnom ciklusu.



Slika 7. Sustav pohrane energije u stlačenom CO₂ [14]

2.1.4. Sustav pohrane energije u ukapljenom zraku

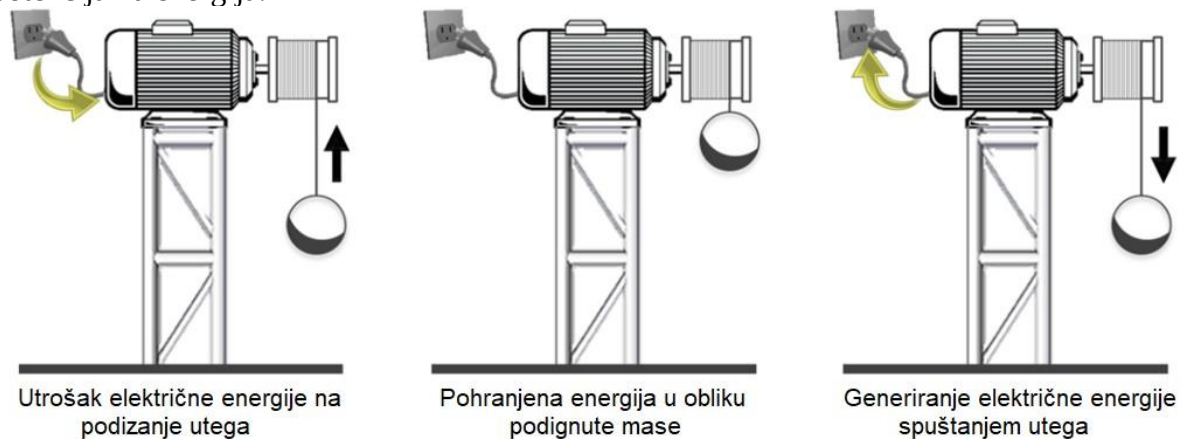
Sustav pohrane energije u ukapljenom zraku (LAES) omogućuje pohranu velikih količina energije. Pohrana većih količina energije je moguća zbog više gustoće zraka u tekućem stanju u usporedbi s plinovitim stanjem [14]. Teoretska učinkovitost procesa seže do 80 % uz korištenje sustava povrata topline, ali mnogo niže u praksi. Trenutno jedino postrojenje postiže učinkovitost od 8 % [16].



Slika 8. Shematski prikaz LAES sustava [17]

2.1.5. Gravitacijska pohrana

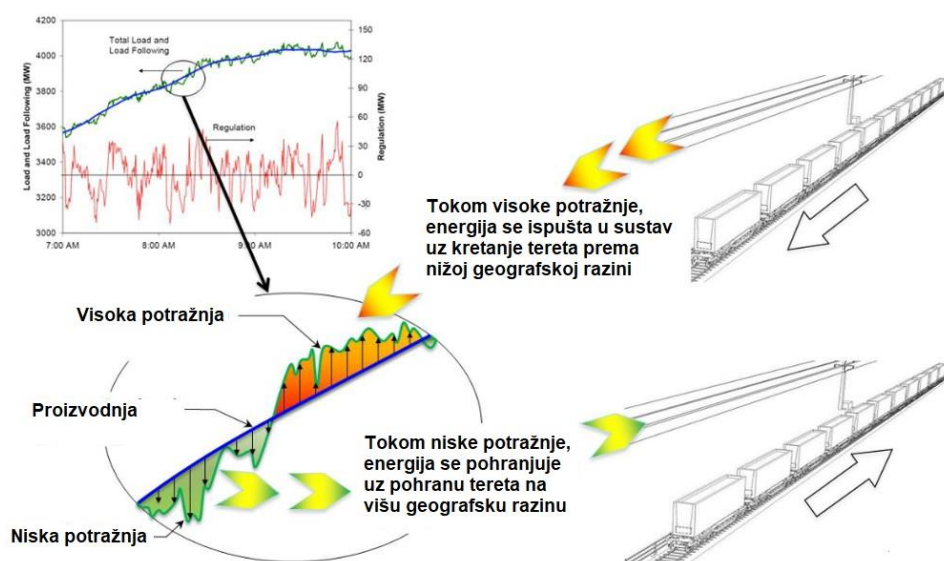
Gravitacijska pohrana energije iskorištava svojstva gravitacijske potencijalne energije. Povećanjem visine na kojoj se nalazi neki objekt, povećava se njegova gravitacijska potencijalna energija.



Slika 9. gravitacijska pohrana energije [13]

2.1.5.1. Pohrana putem utega na kosini

Ova vrsta pohrane energije se zasniva kao što prikazuje Slika 10. na pomicanju utega putem vrste vlaka uzbrdo kako bi se pohranila energija te spuštanjem natrag kako bi se povratila energija u mrežu. Vlakovi su tokom cijelog postupka povezani s električnom mrežom te u povratku isporučuju energiju putem regenerativnog kočenja. Sustav se može prilagoditi potrebama mreže putem promjene broja utega koji u isto vrijeme sudjeluju te promjenom brzine putovanja [13]. stoga je sustav modularan i lako prilagodljiv potrebama. Tablica 6. prikazuje osnovne podatke o sustavu. Problem ove vrste sustava pohrane energije je potreba za velikim površinama pod nagibom potrebnih za instalaciju sustava većih snaga. Vrijeme odaziva ovog sustava je između 5 i 25 s što ograničuje primjenu na balansiranje dugotrajnijih poremećaja u elektro-energetskom sustavu.



Slika 10. ARES sustav [13]

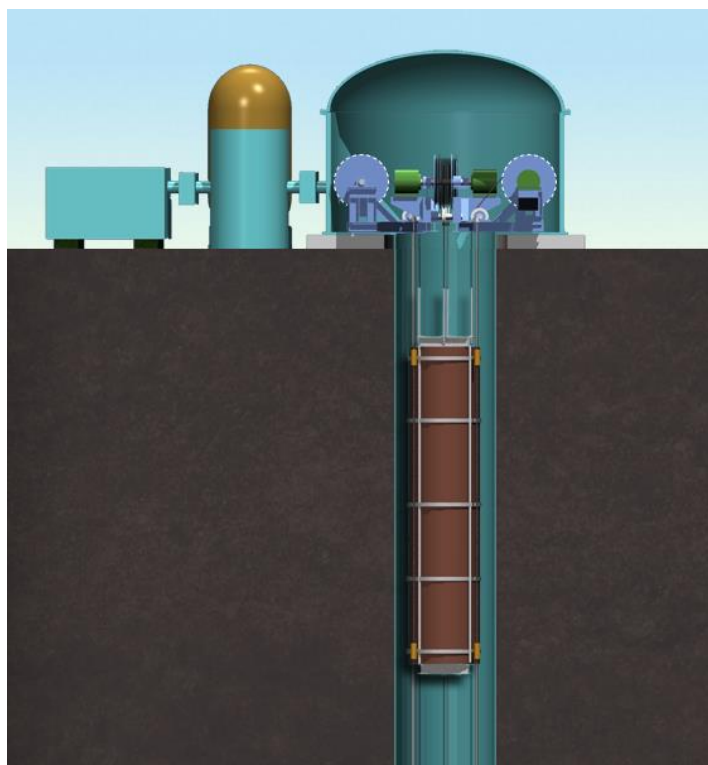
Tablica 6. Podaci o sustavu [13]

Veličina	Iznos	Jedinica
Snaga	100 do 3000	MW
Trajanje pražnjenja	2 do 24	Sat
Vrijeme odziva	5 do 25	s
Učinkovitost	78	%
Vrijeme potpunog pražnjenja	37	s
Gubitci stajanja	0	%
Životni vijek	40	Godina
Kapitalna investicija prema instaliranoj snazi	1350	\$/kW
Kapitalna investicija prema kapacitetu pohrane	168	\$/kWh

2.1.5.2. Uteg - Rudarska okna

Ovaj sustav pohrane energije se zasniva na ovješanju utega u napuštenim rudarskim oknima ili posebno izrađenim oknima. Sustav se sastoji od okna, utega mase 500 do 5000 tona, električnih motora/generatora, sustava kolotura te upravljačke elektronike.

Količina spremljene energije osim o masi utega ovisi i o razlici visina gornje i donje točke. Ovaj sustav je također modularan i može se dimenzionirati prema potrebama. Tablica 7. prikazuje osnovne podatke o sustavu. Vrijeme odaziva je ispod jedne sekunde.



Slika 11. Gravitacijska pohrana energije [19]

$$E = \rho \cdot V \cdot g \cdot \Delta h$$

Gdje je:

- E – pohranjena energija u obliku gravitacijske potencijalne energije [kJ]
- ρ – gustoća materijala utega [kg/m^3]
- V – volumen utega [m^3]
- g – gravitacijska konstanta ubrzanja [m/s^2]

Tablica 7. Podaci o sustavu gravitacijske pohrane energije [19], [20]

Naziv	Iznos	Jedinica
Snaga	1 do 20	MW
Učinkovitost	80 do 90	%
Odaziv do pune snage	<1	s
Duljina pražnjenja	0,25 – 8	h
Životni vijek	50	Godina
Trošak pohrane	3542	\$/kWh
Trošak snage	574	\$/kW
LCOS	123	€/MWh

Problem u implementaciji ove tehnologije bi mogao biti nedostatak prikladnih lokacija i karakteristika rudarskih okna. Postavlja se zahtjev na dovoljno veliki promjer, te odsustvo akumulirane vode u oknu što bi moglo dodatno povisiti troškove sustava. Mana ovog sustava

je relativno niska gustoća energije te zbog toga visoka cijena sustava. Ipak, nivelirani trošak pohrane energije u ovoj vrsti sustava je nizak u iznosu od 123 \$/MWh što je usporedivo sa reverzibilnih hidroelektranama te sustavima stlačenog zraka. Dodatna prednost nad spomenutim tehnologijama je smanjena ograničenja u pogledu lokacije instalacije te se očekuje komercijalizacija tehnologije u roku od 15 do 20 godina [21], [22].

2.1.6. Reverzibilne hidroelektrane

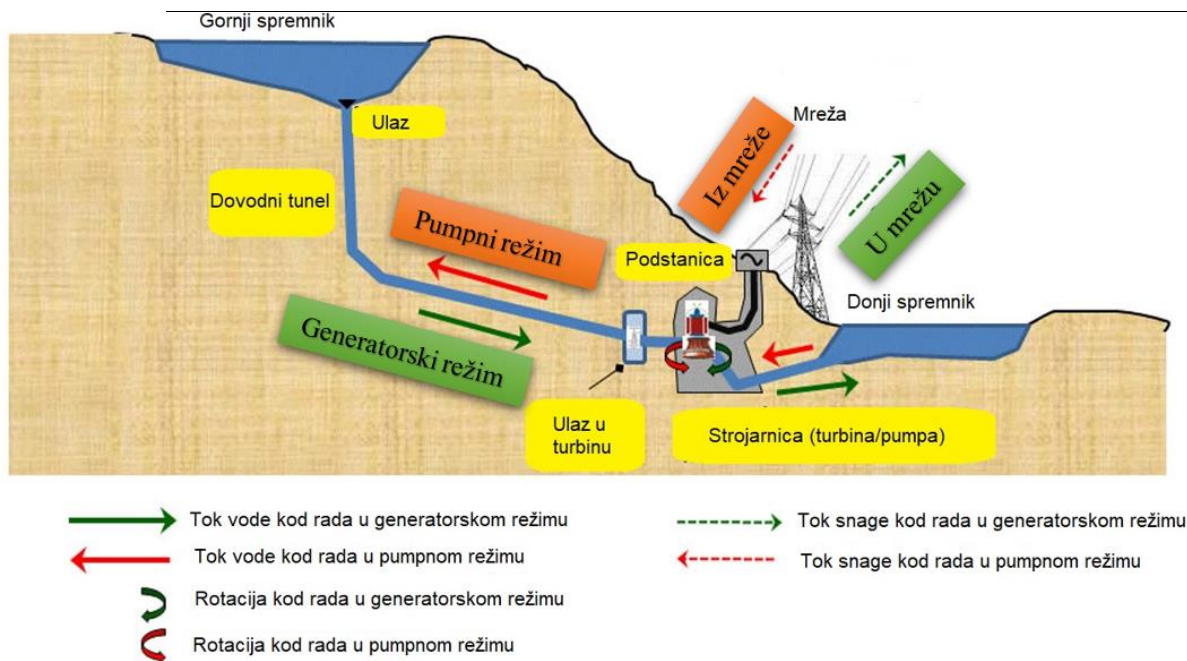
Reverzibilne hidroelektrane (engl: „*Pumped hydro storage*“ – PHS) su vrsta hidroelektrana koje imaju mogućnost rada u pumpnom režimu. Kod rada u pumpnom režimu hidroelektrana ulaže energiju kako bi pumpala određenu količinu vode na višu nadmorsku razinu. Povećanjem nadmorske visine skladištene vode, također dolazi i do spremanja električne energije u obliku gravitacijske potencijalne energije. Ponovnim puštanjem u pogon postrojenja u turbinskom režimu, dolazi do povrata dijela spremljene energije u mrežu. Razmatrajući samo rad u turbinskom i pumpnom režimu, dolazi se do učinkovitosti pohrane od 90 %. Ipak, postižu se učinkovitosti u rasponu od 70 do 80 %. Zapremnina energije sustava reverzibilnih hidroelektrana je u korelaciji s visinskom razlikom jezera, volumenom gornjeg jezera te učinkovitosti sustava. PHS je trenutno najzastupljeniji sustav pohrane energije sa instaliranim kapacitetom od 158 GW s očekivanih dodatnih 78 GW u izgradnji do 2030. potencijal na svjetskoj razini iznosi 83 EJ dok se na području EU kreće između 39,6 PJ i 442,8PJ od čega ekonomski potencijal iznosi između 14,3 PJ i 118,5 PJ [21]. Nivelirani trošak pohrane energije ovisi o radu samog sustava te se može drastično razlikovati. Iznos niveliranog troška pohrane energije se kreće između 77 i 400 \$/MWh [10].

Potrebno je razlikovati zatvorene i otvorene sustave reverzibilnih hidroelektrana.

Zatvoreni sustavi se oslanjaju na razliku visina između 2 jezera je hidroelektrana prebacuje vodi između ta 2 jezera bez dodatnih pritoka osim podzemnih voda i oborinskog sliva. Primjer ovog sustava je PHS Turlough Hill u Irskoj koji se sastoji od gornjeg jezera na brdu i donjeg jezera u podnožju brda bez dodatnih pritoka.

Češći je ipak otvoreni sustav koji također koristi 2 vodna tijela. U ovoj vrsti sustava, barem jedno od vodnih tijela je tekuće vodno tijelo, tj. rijeka, jezero s pritocima ili otvoreno more. Primjer ovog sustava je RHE Velebit.

Slika 12. daje shematski prikaz reverzibilne hidroelektrane, a tehnički i financijski podaci su prikazani u Tablica 8.



Slika 12. Shema reverzibilne hidroelektrane [24]

Tablica 8. Podaci o tehnologiji [25]

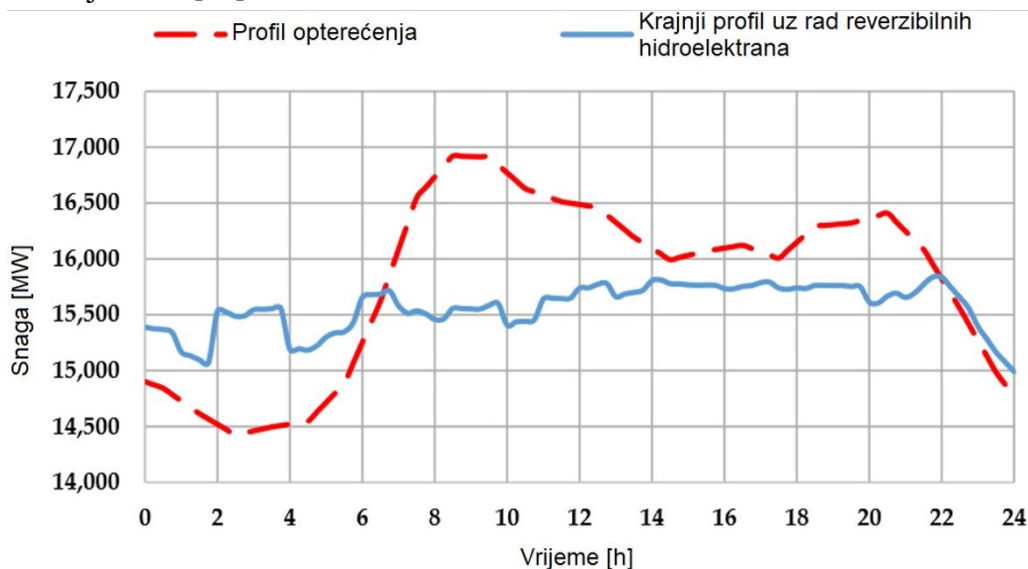
Tehnologija	Jedinica	2020	2030	2050
Snaga	MW	10 - 1000	10 - 1000	10 - 1000
Učinkovitost	%	70 - 80	70 - 80	70 - 80
Vijek trajanja	God	50	50	50
Gradnja		2 - 3	2 - 3	2 - 3
Investicija, pumpno postrojenje	M€/MW	0,6	0,6	0,6
Investicija, ukupno	M€/MW	< 4	< 4	< 4
Fiksni troškovi rada i održavanja	€/MW/god	6000 - 12000	6000 - 12000	6000 - 12000
Varijabilni troškovi	€/MWh	Ovisi o cijeni električne energije		
LCOS	€/MWh	77 - 400		

U prošlosti su se reverzibilne hidroelektrane koristile kako bi se izbalansirala prekomjerna proizvodnja električne energije tokom noćnih sati u sustavima s većim kapacitetima termoelektrana. Izbjegavalo se smanjenje snage termoelektrana zbog visokog tehničkog minimuma i problema s učinkovitosti pri nižim snagama. Tokom povećane potražnje za električnom energijom su se reverzibilne hidroelektrane koristile u turbinskom režimu te vraćale energiju u mrežu.

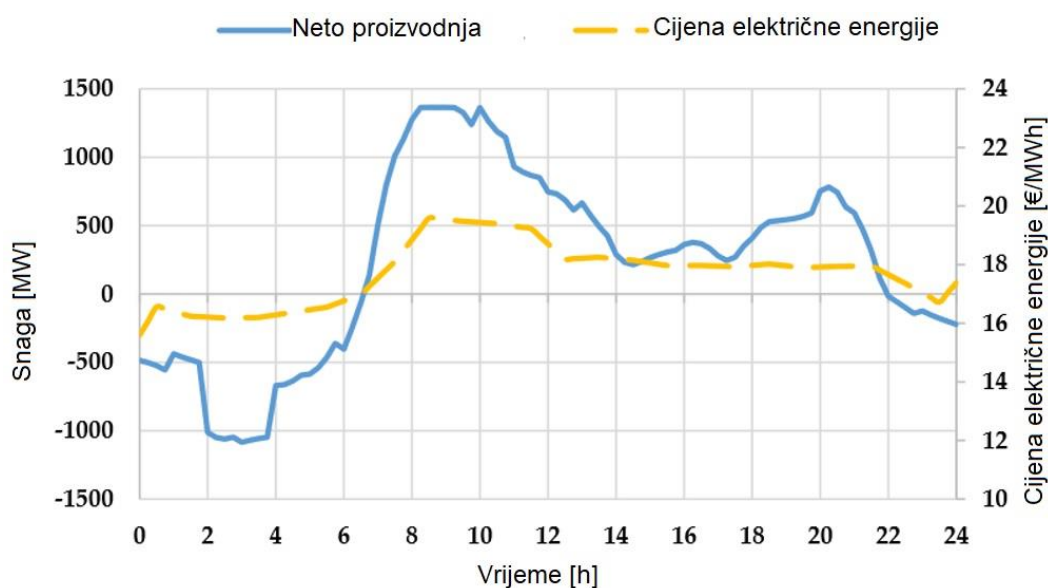
Uz uvođenje varijabilnih izvora energije i dinamičnog tržišta električne energije se mijenja i rad reverzibilnih hidroelektrana.

Slika 13. i Slika 14. prikazuju rad reverzibilne hidroelektrane u slučaju prisutnosti varijabilnih izvora energije i dinamičnih cijena električne energije. Simulacije su izrađene na primjeru Norveškog elektro-energetskog sustava. Vidljivo je da sustav optimizira pogon tako da pruži maksimalni prihod. Akumulacija se puni u periodu niskih cijena električne energije te se prazni kod visokih cijena. Rezultat ovog pogona je gotovo konstantna krivulja opterećenja sustava s izuzećem reverzibilnih hidroelektrana. Također dolazi do povećanja prihoda zbog učinkovitijeg pogona sustava. Sustav koji pretpostavlja samo uravnoteženje dnevnog opterećenja prihoduje

13 473 €/mjesec, dok sustav koji slijedi cijene električne energije i optimizira pogon, prihoduje 115 040 € mjesečno [26].



Slika 13. Utjecaj reverzibilne hidroelektrane na opterećenje mreže [26]



Slika 14. Utjecaj dinamičnih cijena [26]

2.2. Kemijska pohrana

Pohrana energije u obliku kemijske energije pretpostavlja korištenje energije koja može biti u obliku električne ili toplinske energije u svrhu proizvodnje goriva.

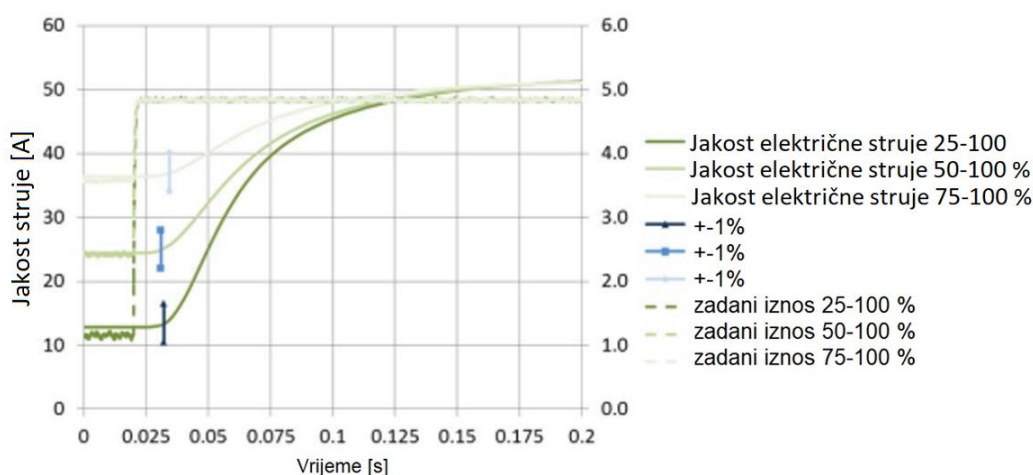
U svrhu odgovora potrošnje i postizanja niskougljičnog energetskog sustava najzanimljivije su tehnologije proizvodnje vodika te sintetskih goriva (engl: „power to gas“).

Vodik se može koristiti izravno ili može biti sastavni dio nekog od povezanih nositelja energije kao što su sintetska goriva i amonijak.

2.3. Pohrana energije u vodik

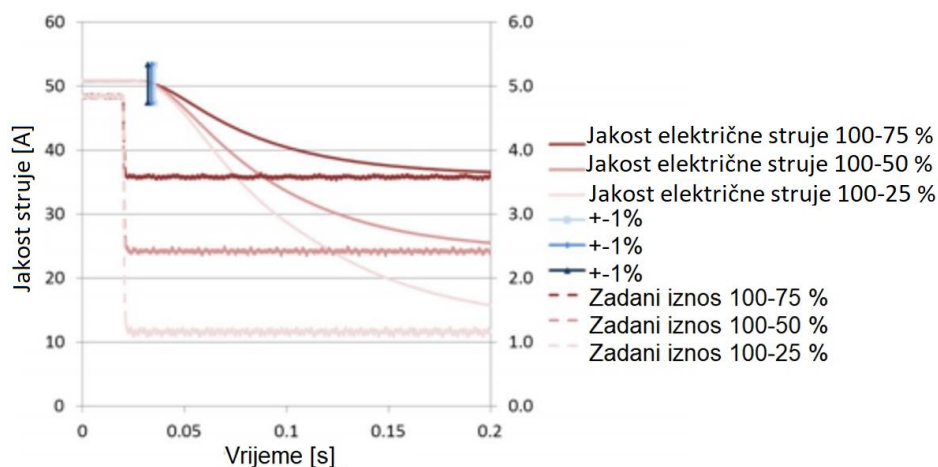
Iako je najrasprostranjeniji element u svemiru i Zemlji, vodik se ne nalazi u elementarnom stanju, nego uvijek u kombinaciji s nekim drugim elementom. Za razmatranja u pogledu energetike, najprikladniji je oblik vodika spoj s kisikom, tj. voda te je potrebno uložiti energiju za pridobivanje elementarnog vodika što čini ukupnu energetske bilancu vodika negativnom. Iz tog razloga se vodik često naziva nositeljem ili vektorom energije, a ne izvorom. Vodik se može dobiti elektrolizom vode za što se koristi električna energija. Ova tehnologija pruža potencijal za uvođenjem odgovora potrošnje. Odlikuje je visoka potreba za električnom energijom kako u pogledu snage, tako i u pogledu energije. Također, sustavi proizvodnje vodika uključuju i sustave pohrane te se time omogućuje fleksibilan pogon sustava.

Slika 15. prikazuje rezultate pokusa brze promjene snage PEM elektrolizatora. Vidljivo je da sustav postiže promjenu od 25 do 100 % snage ispod 0,1 sekunde čime zadovoljava uvijete za primarnu regulaciju elektroenergetskog sustava [27].



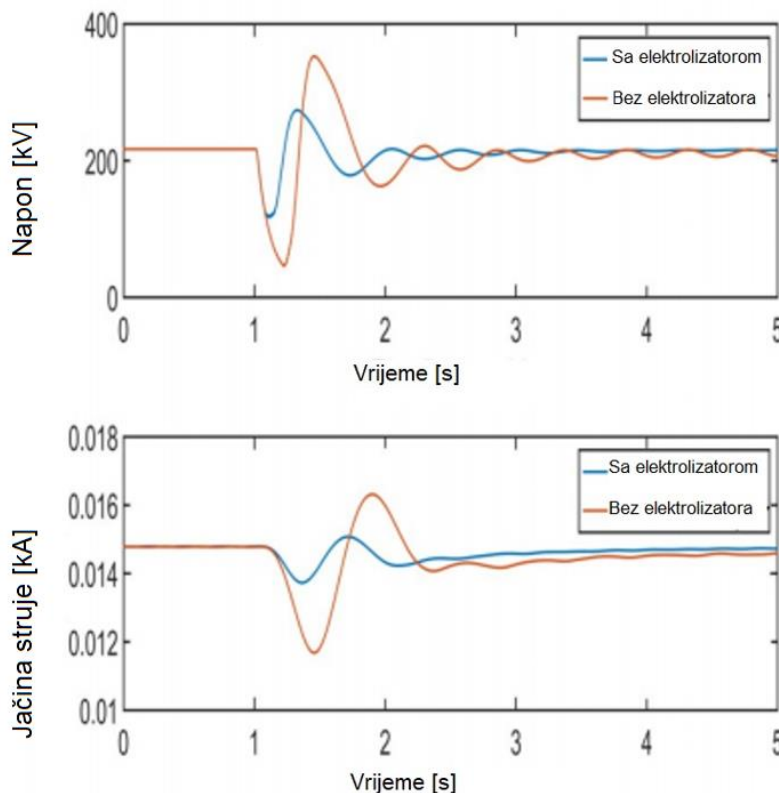
Slika 15. Povećanje snage elektrolizatora od 25 do 100 % nazivne snage [27].

Situaciju sa smanjenjem snage prikazuje Slika 16. Elektrolizator može od rada pri 100 % doći do 25 % snage unutar 0,2 sekunde.



Slika 16. Smanjenje snage elektrolizatora od 100 do 25 % nazivne snage [27]

Slika 17. prikazuje odgovor potražnje od strane elektrolizatora u slučaju kvara u mreži. Vidljivo je da unutar 3 sekunde dolazi do potpunog uravnoteženja mreže, a oscilacije i u jačini struje i u naponu su niže kod sustava koji sadržava elektrolizator s mogućnosti odgovora potrošnje.



Slika 17. Balansiranje mreže tokom kvarova u sustavu [27]

Proizvodnja vodika u smislu P2G tehnologije podrazumijeva brze promjene snage i nizak tehnički minimum. Razmatra se upotreba alkalnih i PEM elektrolizatora. U tom slučaju su najprikladniji PEM elektrolizatori s tehničkim minimumom između 0 i 10 % nazivne snage. Za usporedbu, alkalni elektrolizatori postižu tehnički minimum od 10 do 40 % [28].

Također, novi tip elektrolizatora pod nazivom SOEC se istražuje kao moguća primjena u P2G namjeni.

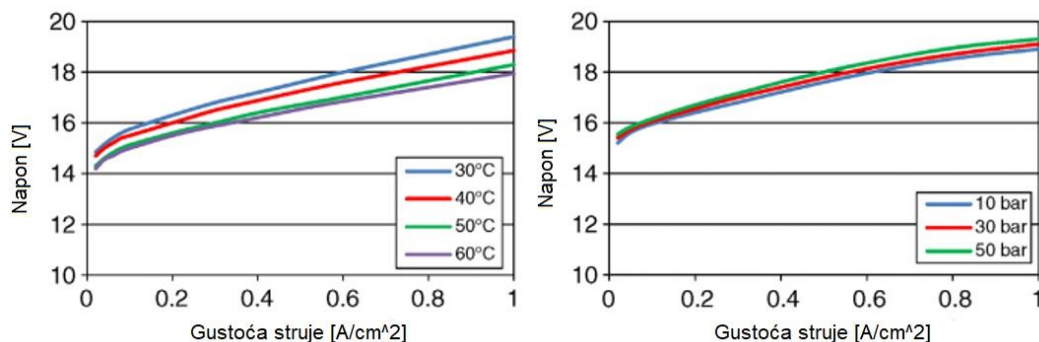
Tablica 9. Dinamičke karakteristike elektrolizatora [28]

Veličina	Jedinica	AEC	PEM	SOEC
Hladan start	min	< 60	< 20	< 60
Temperatura	°C	60-80	50-80	650-1000
Vrijeme odaziva	Red veličine	sekunda	milisekunda	sekunda

Varijacije u snazi u odnosu na nazivnu snagu također utječu na učinkovitost elektrolizatora. Svaki elektrolizator posjeduje radnu točku u kojoj pruža najveću učinkovitost u radu. Ta radna točka je definirana temperaturom i tlakom koji su pak funkcija trenutne snage elektrolizatora. Promjenom snage te radom ispod nazivne snage postoji mogućnost nedostizanja optimalnih radnih parametara te uslijed toga smanjenje učinkovitosti sustava. U ovom slučaju također alkalni elektrolizatori pružaju nižu učinkovitost. Kod smanjenja snage ispod tehničkog minimuma potrebno je potpuno ugasi ti elektrolizator te ispustiti nastali vodik kako ne bi došlo

do neželjenih reakcija s kućištem uređaja. Potpuno zaustavljanje pogona i ispuštanje vodika uzrokuje dodatne gubitke [29], [30].

Slika prikazuje utjecaj temperature i tlaka na potrošnju energije predstavljenu putem napona i gustoće struje. Vidljivo je da povećanjem temperature, a zadržavanjem jednakog napona pada gustoća struje. Na sličan način se vidi i pad napona uz zadržavanje konstantne jačine struje. Jednaki odnos predstavlja dijagram odnosa navedenih veličina i tlaka [31]



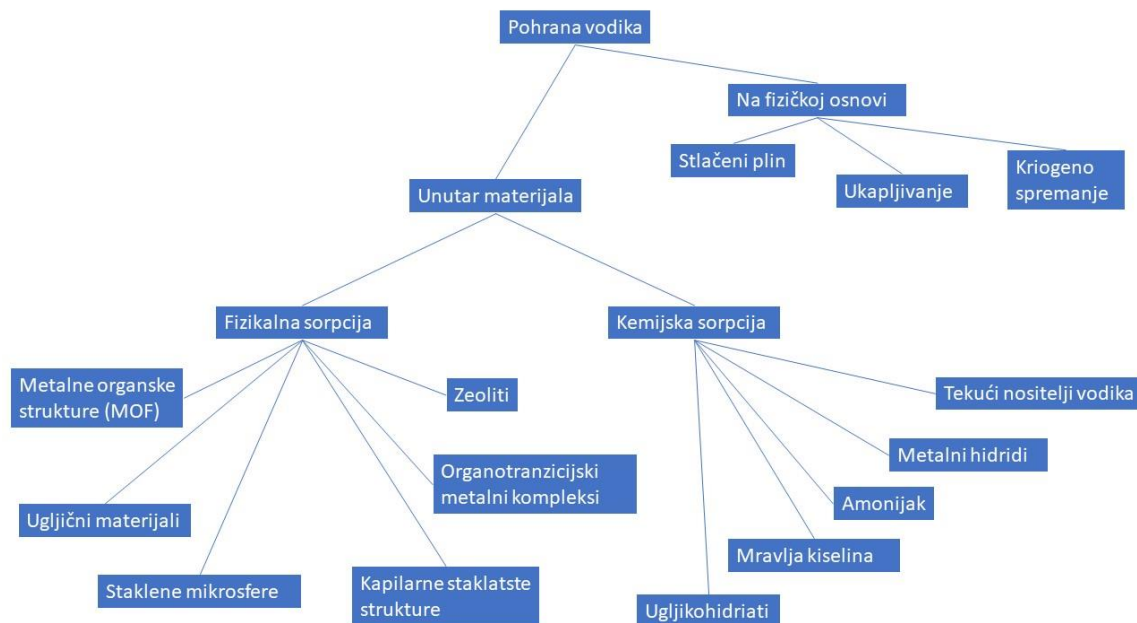
Slika 18. Učinkovitost elektrolizatora [31]

U budućnosti se očekuje pad investicijskih troškova te povećanje učinkovitosti elektrolizatora kao što prikazuje Tablica 10.

Tablica 10. Učinkovitost i investicijski troškovi elektrolizatora [32]

Veličina	Jedinica	Danas			2030			U daljoj budućnosti (2050.)		
		AEC	PEM	SOEC	AEC	PEM	SOEC	AEC	PEM	SOEC
Učinkovitost	%	63-70	56-60	74-81	65-71	63-68	77-84	70-80	77-84	77-90
Investicija	USD/kW	500-1400	400-850	200-700	1100-1800	650-1500	200-900	2800-5600	200-900	500-1000

Vodik je najjednostavniji element, a sastoji se od samo jednog neutrona i protona. Zbog toga dolazi do problema s njegovim skladištenjem. Posjeduje veliku gravimetrijsku gustoću energije u iznosu od 120 MJ/kg, ali nisku volumetrijsku gustoću od samo 0,012 MJ/l pri atmosferskom tlaku ili 2,8 do 4,7 MJ/l pri tlaku od 300 do 700 bar. Dodatan problem koji se pojavljuje u skladištenju vodika je prebjeg tvari kroz stjenku spremnika uslijed male veličine samih atoma vodika. Iz tog razloga se pribjegava korištenju nekih od metoda prikazanih na Slika 19. Svaka od prikazanih metoda zahtjeva upotrebu dodatne energije u svrhu skladištenja problem je što je nemoguće pridodati spoj mirisa kao što se dodaje primjerice prirodnom plinu jer ne postoji dovoljno lagani spoj. Ipak, vodik nije otrovan i iako je zapaljiv u vrlo širokom spektru mješavina s kisikom, brzo dolazi do difuzije samog vodika te zbog toga ne predstavlja veliki rizik od požara [33]. Tablica 11. prikazuje financijske podatke o sustavima pohrane vodika.



Slika 19. Vrste pohrane vodika [34]

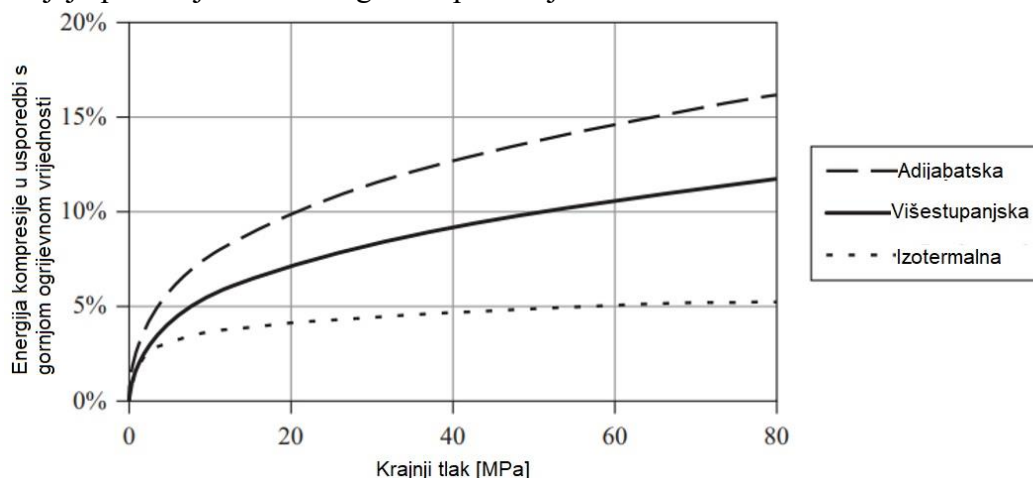
Tablica 11. Financijski podaci o pohrani vodika [33]

Vrsta pohrane	Gravimetrijska vrijednost	Volumetrička vrijednost	Trošak
	kWh/kg	kWh/l	\$/kWh
Pod tlakom 700 bar	1,9	1,3	16
Kompleksni metalni hidridi	0,8	0,6	16
Metalni hidridi	1,6	1,4	8
Tekući vodik	2	1,6	6

Vodik je moguće pohranjivati primjenom fizičkih procesa kompresije i ukapljivanja što oboje zahtjeva značajne količine energije. Alternativno, moguće je uz korištenje fizičkih i kemijskih svojstava vodika skladištenje stvaranjem novih spojeva ili integracijom u postojeće materijale. Tako se primjerice može doći do kreiranja nosioca energije kao amonijak, sintetskih goriva, organskih ulja ili pak metalnih hidrida i zeolita.

Slika 20. Prikazuje utrošak energije pri kompresiji vodika. Potrebno je utrošiti između 5 i 12 % pohranjene energije u samom vodik u njegovu kompresiju do zahtijevanog tlaka. Utrošak energije raste s porastom tlaka kompresije [35]. Teoretski je dovoljno utrošiti 1,05 kWh/kg za kompresiju od 20 do 350 bar i 1,36 kWh/kg za kompresiju do 700 bar, ali zbog gubitaka taj utrošak raste do 1,7 do 6,4 kWh/kg [36] u odnosu na gustoću energije vodika od 33,33 kWh/kg [2]. Ukapljivanje vodika zahtjeva postizanje izrazito niskih temperatura od ispod 33 K te zbog toga zahtjeva veliki utrošak energije. Teoretski je potrebno od 3,3 do 3,9 kWh/kg, ali uključujući gubitke se dolazi do raspona od 7 do 13 kWh/kg. Uslijed velikog utroška energije i

korištenja opreme čiji se rad može prilagoditi potrebama, navedeni sustavi pohrane vodika predstavljaju potencijal u vidu odgovora potrošnje.



Slika 20. Utrošak energije na kompresiju vodika [35]

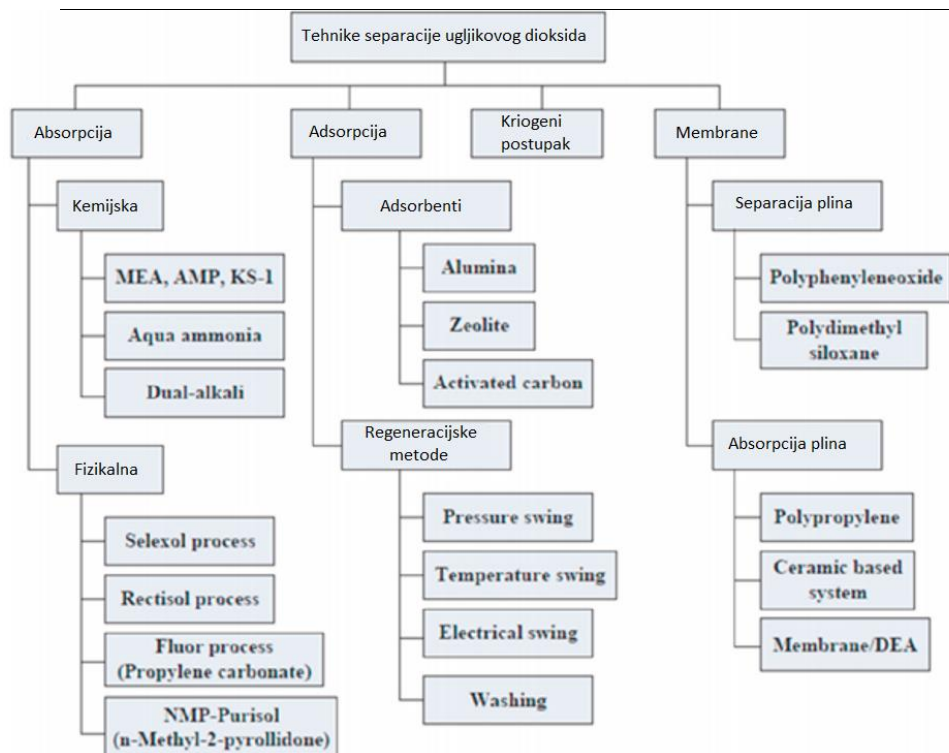
Pohrana vodika u obliku metalnih hidrida je učinkovitija. Gubitci energije nastaju kod same pohrane kod pojave egzotermne reakcije i uslijed ispuštanja vodika iz metalnog hidrida što je endotermna reakcija te zahtjeva dovođenje topline. Ukupno se izgubi oko 5 do 8 % energije na proces pohrane [37].

Učinkovitost cijelog procesa varira u ovisnosti gdje se netom proizvedeni vodik koristi. Kod korištenja gorivih ćelija u rasponu od 30 do 40 % dok se kod kombiniranog ciklusa kreće 50 do 60 %. Trenutno instalirani kapacitet elektrolizatora iznosi 25 MW. Prednost P2G sustava je mogućnost dugoročne pohrane energije.

2.3.1. Izdvajanje ugljikovog dioksida CO_2

Izdvajanje ugljikovog dioksida je sastavan dio pripreme sintetskih goriva te također zahtjeva značajne količine energije kako toplinske, tako i električne. Zbog tog se razloga ovdje navode i metode izdvajanja CO_2 .

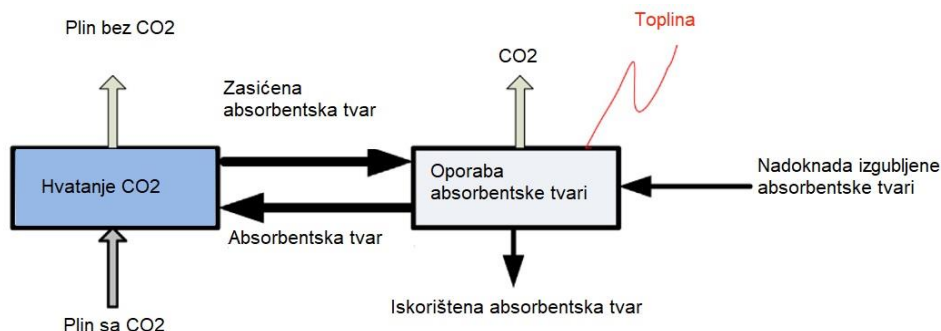
Postoje 3 osnovne vrste hvatanja ugljika. Prva se odnosi na hvatanje iz struje plina visoke koncentracije CO_2 što je najčešće nakon izgaranja goriva koje sadržava ugljikovodike. Druga vrsta se odnosi na hvatanje prije procesa izgaranja. Primjer ovog procesa je plinifikacija krutog goriva čiji je rezultat plin visoke koncentracije H_2 i CO_2 . Uslijed visoke koncentracije, CO_2 se hvata, dok se H_2 koristi u daljnjoj energetske konverziji. Moguće je ovaj proces provoditi i s uobičajeno dostupnim gorivima, ali je potrebno provoditi izgaranje u čistom kisiku kako bi dimni plinovi sadržavali vrlo visoku koncentraciju CO_2 što značajno pospješuje apsorpciju ili pak omogućava direktnu kompresiju i skladištenje dimnih plinova. Treća vrsta podrazumijeva izravno hvatanje CO_2 iz zraka što također predstavlja i najveće tehničke izazove uslijed niske koncentracije.



Slika 21. Tehnologije hvatanja ugljika [34]

Uslijed visokih koncentracija CO_2 , moguća je primjena fizičke absorpcije. Primjerice kod sustava plinifikacije ugljena, koncentracija CO_2 u produktima izgaranja može doseći 35 do 40 % ili kod biomase u rasponu od 9 do 23 % [38]. U tim slučajevima visokih tlakova i visoke koncentracije, moguće je koristiti fizička otapala kao Selexol. Prednost ove metode je izostanak potrebe za velikim količinama toplinske energije kao što je slučaj kod korištenja kemijske adsorpcije te procesa zagrijavanja otopine MEA kako bi se ispustio otopljeni CO_2 u plinovito stanje. Također, ovaj proces posjeduje vrlo visoku učinkovitost u hvatanju CO_2 od 98 %.

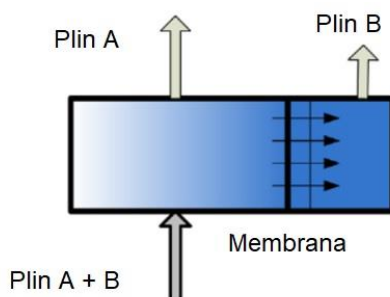
Slika 22. prikazuje osnovni shemu kemijske absorpcije CO_2 . Ovdje razmatrani dio procesa se odnosi na regeneraciju otapala CO_2 . kod regeneracije se koriste velike količine topline jer je otapalo potrebno zagrijati na višu temperaturu kako bi se mogao osloboditi otopljeni CO_2 . Korištenje velikih količina topline predstavlja potencijal uvođenja odgovora potrošnje uz korištenje toplinske pohrane kao u P2H sustavu.



Slika 22. Proces absorpcije CO_2 [39]

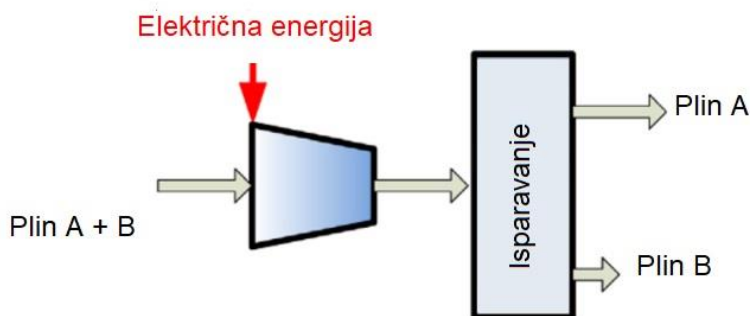
Apsorpcija korištenjem membrana koje propuštaju CO_2 je također primjenjiva kod viših koncentracija CO_2 , ali zahtjeva velike površine membrana. Ipak, pokazuje se ekološki prihvatljivijim rješenjem uslijed izostanka potrebe za otapalima. Minimalna koncentracija CO_2

u plinu iz kojeg se može hvatati je 10 % dok je idealno 20 %. Mana ovog postupka je osjetljivost membrana na povišene temperature, tlakove i plinove niske pH vrijednosti (NO_x i SO_2). Sve od nabrojenog oštećuje membrane i smanjuje njihovu učinkovitost.



Slika 23. Membranska separacija [39]

Kriogeno izdvajanje CO_2 zahtjeva utrošak električne energije kako bi se ispušni dimni plinovi doveli na niski tlak i na temelju različitih točaka isparavanja izdvojili CO_2 i N_2 . Nedostatak ove vrste sustava je visoka razina eksergijskih gubitaka uslijed hlađenja vrućih dimnih plinova.



Slika 24. Kriogena separacija [39]

Tablica 12. Potrebni parametri kod izdvajanja CO_2 [39]

Metoda	Potrebna koncentracija CO_2	Potrebni pritisak	Potrebna temperatura
	%	MPa	°C
Fizička absorpcija	>20	>2	50
Kemijska absorpcija	>3	>0,1	<40
Adsorpcija	>30	Umjereni	Niska do srednja
Kriogeni proces	>50	Umjereni	Niska
Membranski proces	>15	>0,7	Ulazna temperatura iz prethodnog procesa

Potencijal uvođenja odgovora potrošnje u sustavima hvatanja CO_2 je trenutno najprikladniji u dvije vrste rada sustava:

1. Obilazak ili ispuštanje – struja ispušnih plinova se šalje obilaznim vodom i ne prilazi kroz sustav hvatanja CO_2 u vremenima tokom vršnih opterećenja elektro-energetskog sustava i visokih cijena električne energije.
2. Spremanje zasićenog otapala – umjesto podvrgavanju procesu separacije CO_2 iz zasićenog otapala, otapalo se sprema, a separacija se provodi kasnije kad dođe do povoljnijih uvjeta u elektro-energetskom sustavu. Ovaj proces je ipak ograničen veličinama spremnika otapala na do 30 minuta rada u režimu bez aktivnog uklanjanja

CO₂ iz zasićenog aminskeg otapala [40]. Potrebno je napomenuti da je granica od 30 minuta dobivena uslijed razmatranja ekonomskih parametara.

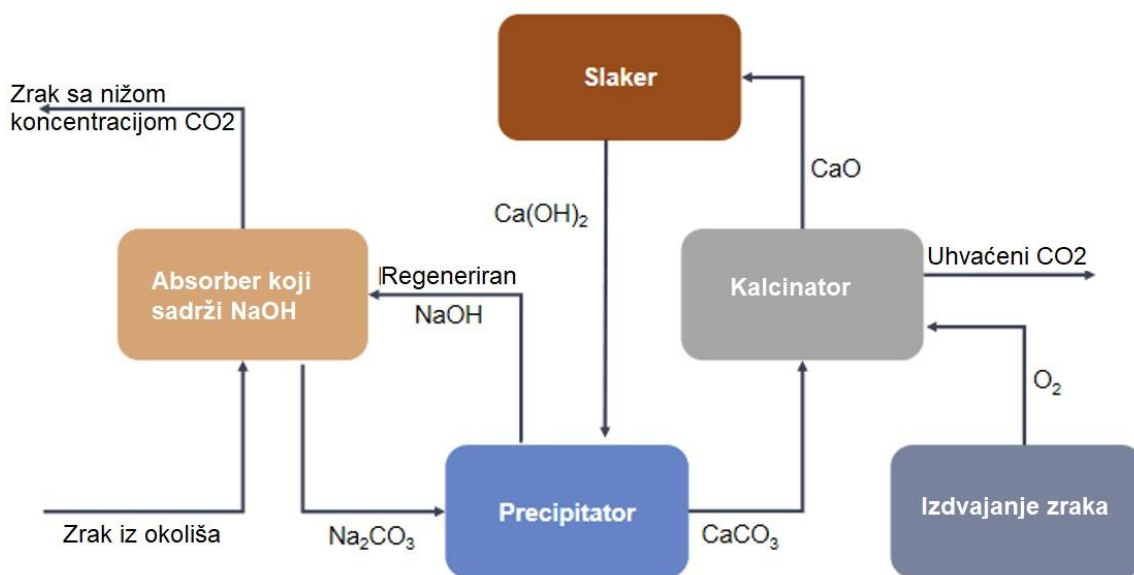
Tablica 13. prikazuje mogućnosti fleksibilizacije pojedinih dijelova procesa hvatanja CO₂.

Tablica 13. Fleksibilnost pojedinih aspekta sustava hvatanja CO₂ [40]

Tehnologija	Prije izgaranja	Poslije izgaranja	Izgaranje u čistom kisiku
Spremanje otopine koja hvata CO ₂	DA	NE	NE
Spremanje tekućeg CO ₂	DA	NE	DA
Istovremena proizvodnja i spremanje H ₂	DA	NE	NE
Isključivanje/uključivanje sustava hvatanja CO ₂	DA	DA	NE
Međuspremište CO ₂	DA	DA	DA

2.3.1.1. Izravno hvatanje ugljika

Iako je koncentracija ugljikovog dioksida u atmosferi relativno mala sa iznosom oko 400 ppm-a, moguće je uhvatiti velike količine plina uz dovodenje velikih količina zraka u kontakt sa sorpcijskim materijalom. Postoje dva načina provedbe procesa. Prvi podrazumijeva korištenje fizičke pojave absorpcije gdje se CO₂ otapa u sorpcijskom materijalu, dok druga metoda podrazumijeva adsorpciju CO₂ na izloženu površinu sorpcijskog materijala. Obje metode u kasnijem koraku zahtijevaju obradu kako bi se pohranjeni CO₂ ispustio. Slika 25. prikazuje shemu procesa izravnog hvatanja ugljika – DACCS. Nivelirana cijena sustava izravnog hvatanja se trenutno kreće između 94 i 232 USD/tCO₂ te postoji potencijal za sniženje cijene na 50 USD/tCO₂ do 2050. godine [41].

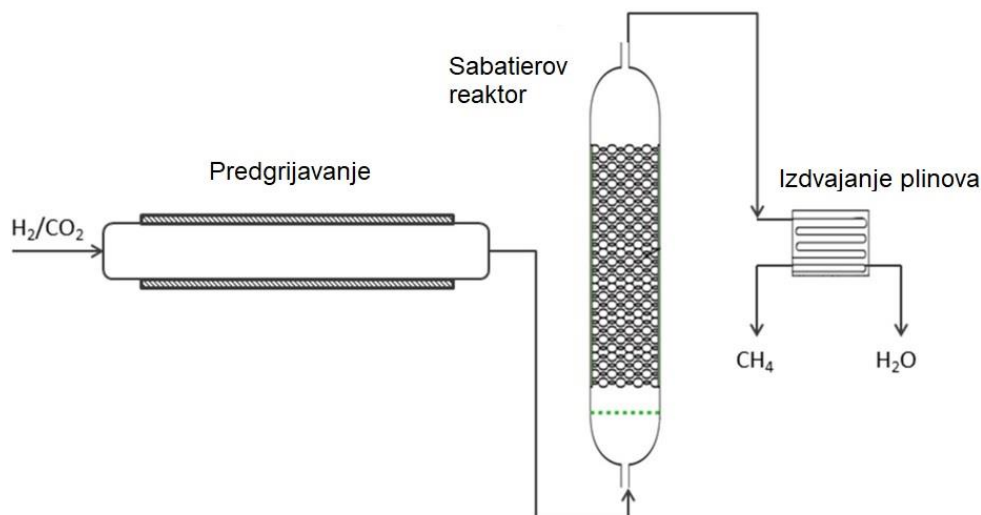


Slika 25. Shema procesa izravnog hvatanja ugljika DACCS [41]

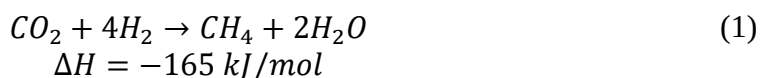
2.3.2. Sintetska goriva

Sintetska goriva se nadovezuju na proces koji se koristi u proizvodnji vodika tako da se u ovom slučaju provodi i hvatanje ugljičnog dioksida. Zatim se provodi sinteza vodika i ugljičnog dioksida u ugljikovodična goriva uz primjenu povišene topline i pritiska korištenjem Sabatierovog postupka.

Kako se reakcija odvija uz povišenu temperaturu i pritisak, moguće je i dijelove ovog procesa fleksibilizirati uz korištenje pohrane topline i pohranu stlačene mješavine plinova prije reakcije. Ipak, glavni doprinos fleksibilnosti ovog procesa se očituje u fleksibilnom pogonu elektrolizatora. Slika 26. prikazuje postupak dobivanja sintetskog plina iz H_2 i CO_2 [42]. Temperatura se kreće između 250 i 400 °C, a tlak između 5 i 10 MPa.



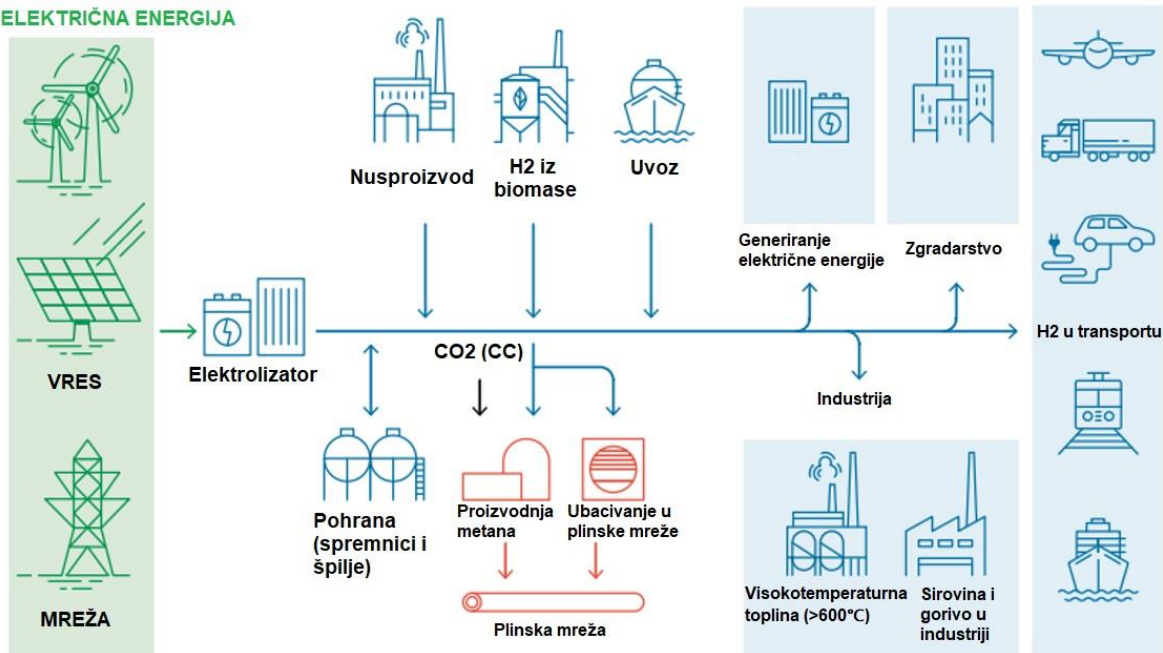
Slika 26. Sabatierov proces [42]



Jednadžba (1) prikazuje reakciju dobivanja sintetskog plina iz vodika i ugljičnog dioksida uz primjenu Sabatierovog procesa. Ukupno se ulaže 165 kJ/mol energije.

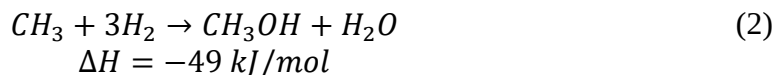
Slika 27. prikazuje proces pripreme sintetskih goriva i korištenje vodika u ostale svrhe. Vidljivo je da vodik može proizaći i kao nusproizvod industrijskih procesa ili procesa organske ili anorganske konverzije otpada.

ELEKTRIČNA ENERGIJA



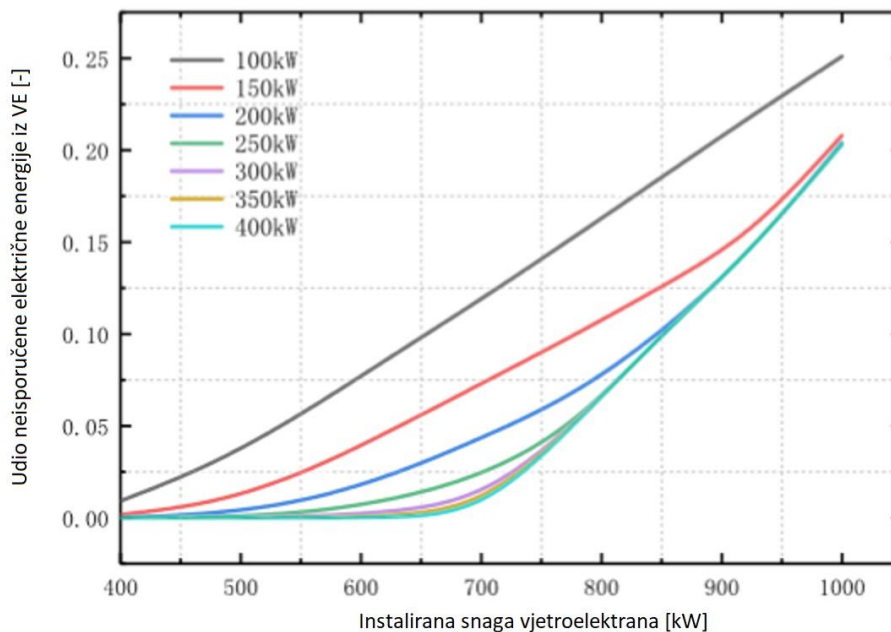
Slika 27. Priprema vodika i sintetskih goriva [43]

Sintetska goriva su prigodna za dugoročno skladištenje energije te dekarbonizaciju sektora koje je nemoguće elektrificirati.



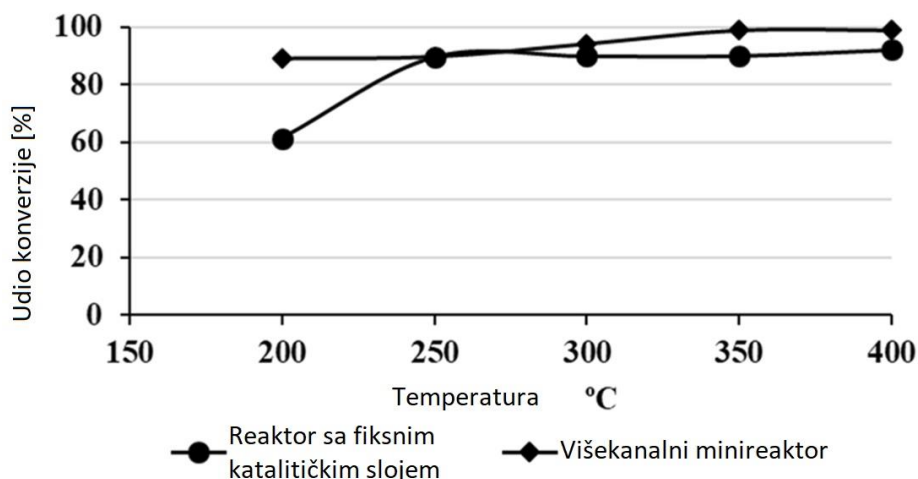
Proizvodnja goriva zahtjeva dodatni korak. Jednadžba (2) prikazuje reakciju dobivanja metanola u kojoj se koristi dodatnih 49 kJ/mol.

Slika 28. prikazuje utjecaj proizvodnje sintetskog plina na CEEP.



Slika 28. Smanjenje CEEP-a pod utjecajem uvođenja proizvodnje sintetskog plina [44]

Učinkovitost Sabatierove reakcije predstavljena putem uspješnosti konverzije CO_2 je prikazana putem Slika 29. učinkovitost konverzije doseže gotovo 100 % na temperaturi iznad 350 °C. Valja primijetiti visoku učinkovitost i kod nižih temperatura odvijanja reakcije što ukazuje na postojeću fleksibilnost sustava.



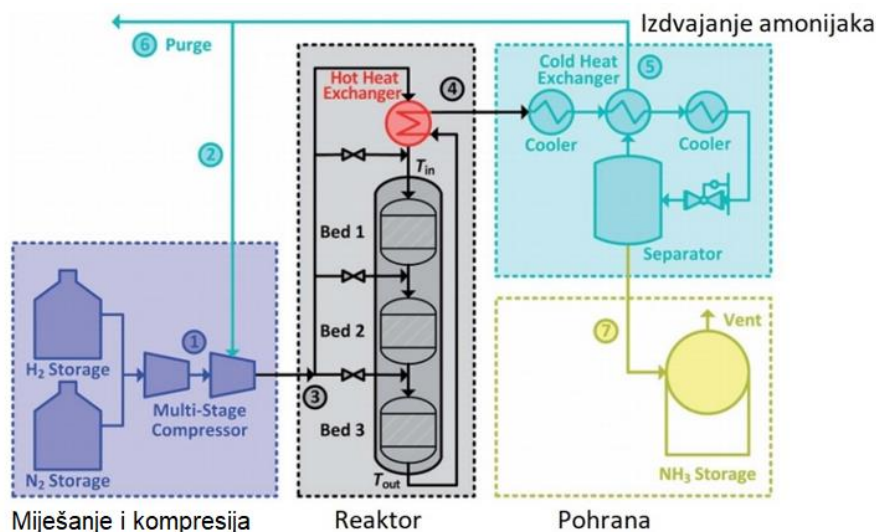
Slika 29. Učinkovitost Sabatier-ove reakcije [45]

Tablica 14. Investicijski troškovi u postrojenje za proizvodnju sintetskih goriva iz vodika i ugljikovog dioksida [46]

Godina	2020	2030	2050
Jedinica	M€/MW	M€/MW	M€/MW
CAPEX	0,6	0,4	0,2

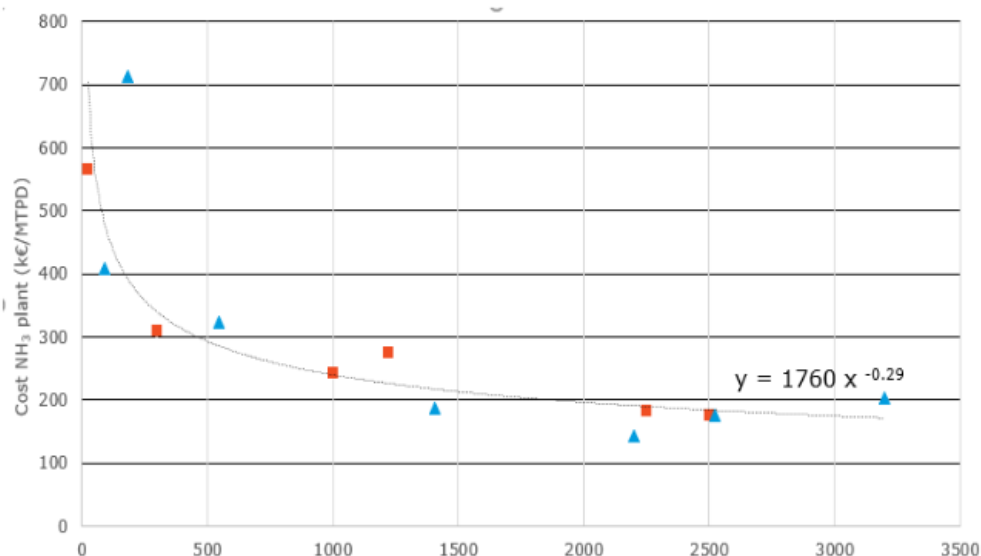
2.3.3. Proizvodnja amonijaka

Slika 30. Prikazuje proces proizvodnje amonijaka (engl: „power to ammonia“, P2A). Također se koristi vodik dobiven elektrolizom. Koristi se Haber-Boschov postupak sinteze amonijaka. Proces je energetski intenzivan te zahtjeva visoke temperature unutar reaktora. Već raspravljena fleksibilnost ovog sustava leži u proizvodnji vodika i njegovom skladištenju.



Slika 30. Proces proizvodnje amonijaka Haber-Boschovim postupkom [47]

Dodatna fleksibilnost se pronalazi u samom procesu. Uslijed promjena dotoka vodika kao rezultat promjene proizvodnje vodika i sam sustav proizvodnje amonijaka može iskazati fleksibilnost. Nepoželjan je rad reaktora izvan projektnih granica jer može doći do gašenja reakcije ili oštećenja katalizatora. Ipak, moguće je smanjiti varirati omjer H_2 i N_2 za 67 % u odnosu na projektno stanje bez pojave neželjenih reakcija što pridonosi fleksibilnosti sustava [47].



Slika 31. Trošak sustava proizvodnje amonijaka NH_3 [32]



2.4. Toplinska pohrana energije

Toplinska pohrana energije se zasniva u obliku pohrane u obliku osjetne topline ili latentne topline. Razlika između pohrane u obliku osjetne topline i latentne topline je što kod pohrane u obliku osjetne topline ne dolazi do promjene faze tvari, dok se pohrane u obliku latentne topline zasniva na toplini promjene faze.

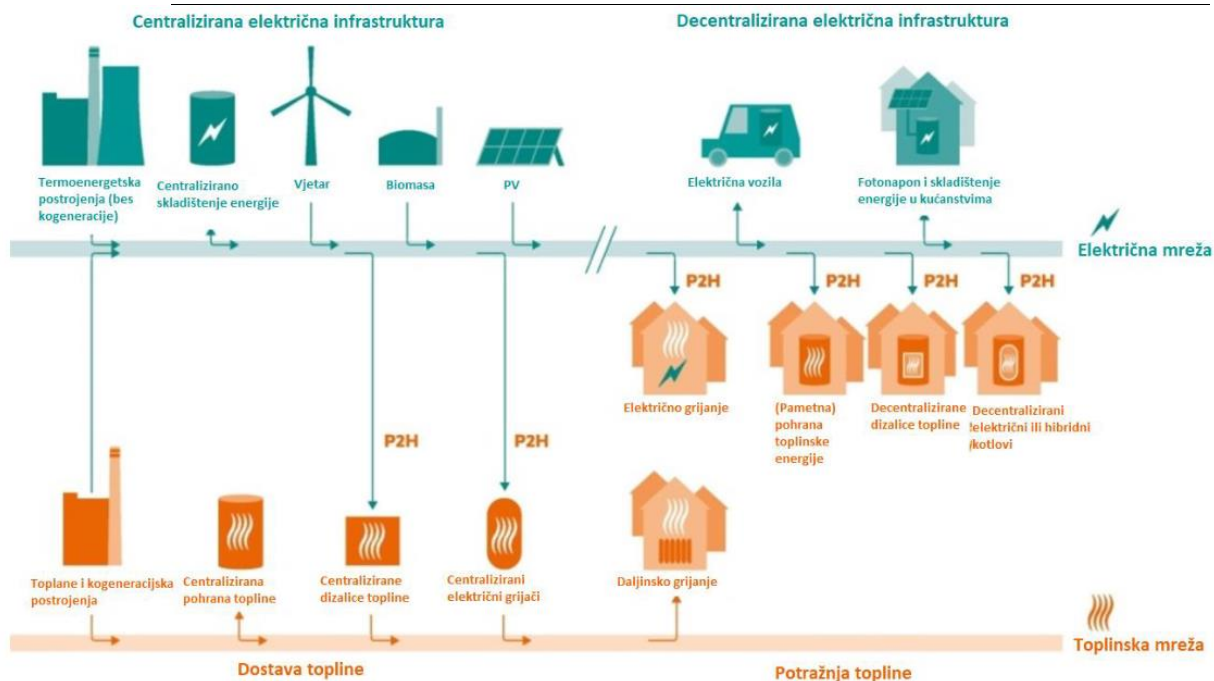
Spona elektro-energetskog i toplinskog sustava

Centralizirani toplinski sustavi se oslanjaju na proizvodnju toplinske energije na jednoj ili više centralnih lokacija. Moguća je implementacija veze elektroenergetskog sustava sa toplinskim sustavom (engl: „Power to heat“, P2H) korištenjem tehnologija konverzije električne u toplinsku energiju. Koriste se uređaji kao što su otpornički električni grijači i dizalice topline. Začeci sustava odgovora potrošnje sežu u povijest sve do početka elektro-energetskih sustava krajem 19. stoljeća kad se nastojalo poticati veću potrošnju električne energije tokom dana. Ciljano uključivanje sustava proizvodnje toplinske energije u sustave odgovora potrošnje počinje tokom 1950-ih. U početku su se koristile analogne kontrole uređaja kao što su PLC i kontrola putem radio veze. Oboje funkcioniraju na principu uvođenja poremećaja u frekvenciju elektro-energetskog sustava koji može na daljinu isključiti određeni uređaj. U isto vrijeme se koristi i ručna kontrola od strane korisnika. Pouzdanost analognih i ručnih sustava kontrole se pokazala problematičnom što se ispravlja pouzdanijom vezom putem internetske veze u novije vrijeme [48]. P2H najčešće predstavlja dio proizvodnih kapaciteta centraliziranog toplinskog sustava te radi u sprezi s ostalim izvorima topline kao što su kogeneracijska postrojenja ili

kotlovi. Ovaj sustav se koristi u vrijeme niskih cijena električne energije uvjetovanih prekomjernom proizvodnjom iz VOIE [48]. S obzirom na oslanjanje na VOIE, većina sustava koristi sustav pohrane toplinske energije za što se može koristiti već postojeća infrastruktura kao primjerice „akumulator topline“ Zagrebačkog TE-TO koji je prvotno osmišljen u smislu racionalizacije pogona sustava kogeneracije i kotlova. Termostatska opterećenja predstavljaju dio opterećenja elektro-energetskog sustava koji je osjetljiv na promijene temperature. U tu skupinu pripada ukupno 12 % opterećenja. Stoga, uslijed velike potrošnje energije, ovaj dio opterećenja ima velik utjecaj na tržište električne energije. Primjerice, u Francuskoj kao primjeru države s visokim udjelom korištenja električne energije za pokrivanje ogrijevnih potreba, cijena tokom zimskog perioda je u prosjeku viša za oko 20 €/MWh u odnosu na ljetno razdoblje [49].

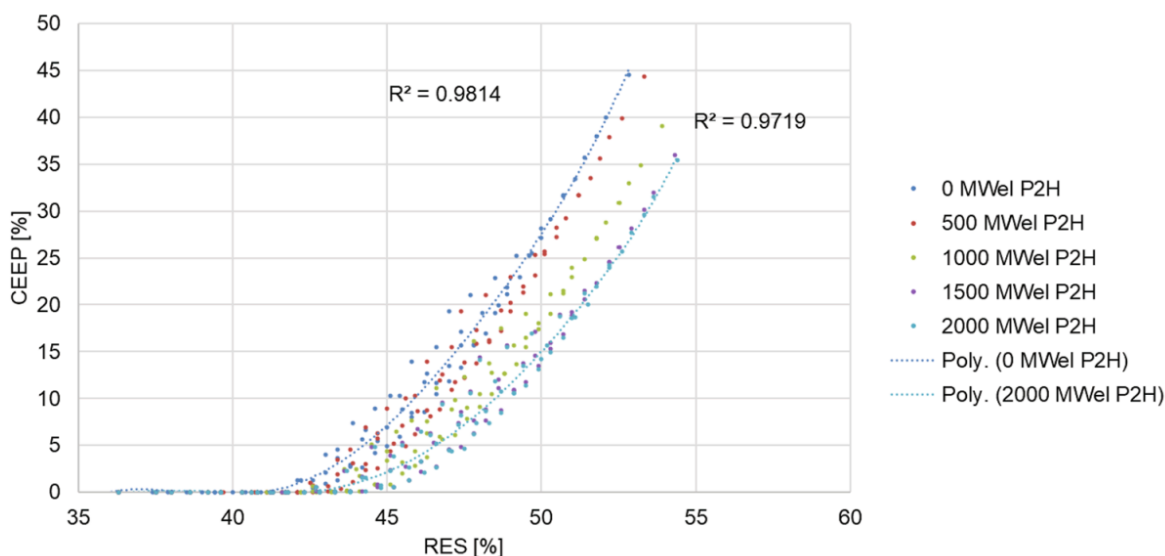


Slika 32. Akumulator topline, TE-TO Zagreb [49]



Slika 33. Povezanost sektora uz uvođenje P2H tehnologije [48]

Slika 34. prikazuje utjecaj P2H sustava na prekomjernu proizvodnju električne energije. Implementacijom ovog sustava se potrošnja električne energije povećava u određenim vremenima kad dolazi do viškova u proizvodnji. Na taj se način izbjegava neiskorištavanje dostupne energije i generiranje CEEP-a. P2H sustav je detaljnije obrađen u izvješčaju D1.1 te se ovdje daje samo osnovan osvrt.



Slika 34. Utjecaj uvođenja P2H na CEEP [52]

Tablica 15. prikazuje financijske podatke o dizalici topline, električnim kotlovima i spremnicima topline.

Tablica 15. Trošak dizalica topline, električnih kotlova i spremnika topline [53], [2]

Godina		2020	2025	2030	2050
Velika dizalica topline	M€/MW	0,86	0,86	0,76	0,76

Električni kotao	M€/MW	0,07	0,07	0,06	0,06
Spremnik topline	M€/GWh	3	3	3	3

P2H ne mora nužno predstavljati dio sustava grijanja ili pripreme potrošne tople vode. Ulogu fleksibilizacije korištenjem varijabilne proizvodnje toplinske energije se može implementirati i na drugim vrstama projekata. Primjerice, pohranom toplinske energije dovoljno visoke temperature kako bi se mogla generirati električna energija u toplinskom ciklusu termoelektrane korištenjem spremnika topline kao ogrjevnog spremnika. Primjena ove tehnologije je vidljiva u sustavima koji koriste rastaljene soli za pohranu toplinske energije, primjerice kod koncentriranih solarnih elektrana ili kod pohrane energije u rastresitom sloju kamena (engl. „rock-bed storage“)

2.4.1. Sustavi pohrane toplinske energije kao mjera fleksibilnosti

2.4.1.1. Centralizirani toplinski sustavi

Tehnologije pod nazivom P2H tehnologije podrazumijevaju pretvorbu električne energije putem električnih grijača ili dizalica topline u toplinsku energiju. Uslijed inertnosti centraliziranog toplinskog sustava ili uz korištenje spremnika topline, može se toplinska energija pohraniti za korištenje u budućnosti. Pohrana se zasniva na svojstvima vode te visokom specifičnom toplinskom kapacitetu koji omogućuje pohranu velikih količina energije. Jednadžba prikazuje izračun ukupne pohranjene energije [54].

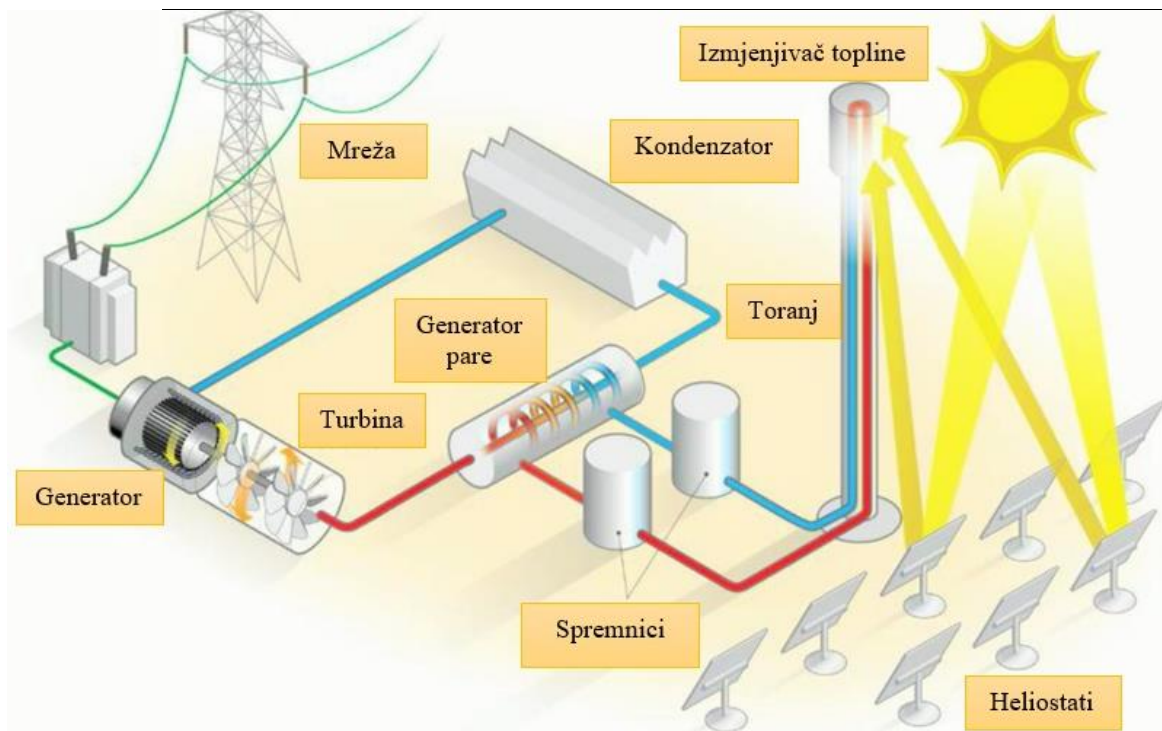
$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (4)$$

Gdje je:

- Q – uskladištena energija [kJ]
- m – masa tvari [kg]
- c – specifični toplinski kapacitet [kJ/kgK]
- ΔT – razlika temperatura [K]

2.4.1.2. Pohrana u obliku rastaljenih soli

Pohrane u obliku osjetne topline je vrsta visoko-temperaturne pohrane toplinske energije. Ova vrsta pohrane se koristi u smislu sustava proizvodnje električne energije za koje su potrebni izvori topline više temperature. Trenutna primjena ove vrste pohrane energije se nalazi u sustavima koncentriranih solarnih elektrana gdje služi u svrhu fleksibilizacije proizvodnje električne energije te mogućnosti rada i tokom noćnih sati [24], [56]. Slika 35 prikazuje shematski prikaz sunčeve koncentrirane elektrane (engl. „Concentrated solar power“ – CSP) s pohranom toplinske energije u obliku rastaljenih soli.



Slika 35. Pohrana toplinske energije [55]

Ova vrsta pohrane energije nije ograničena samo na CSP, već se može koristiti uz bilo koji izvor energije koji može direktno ili indirektno putem električnih grijača pružiti toplinu dovoljno visoke temperature.

Tablica 16. Podaci o visokotemperaturnoj pohrani toplinske energije [56]

Veličina	Iznos	Jedinica
Radna temperatura	150 do 560	°C
Kapacitet	75 do 200	kWh/m ³
Kapacitet	40 do 110	kWh/tona
Učinkovitost pohrane	90 do 99	%
Broj ciklusa	10000	n
Životni vijek	20	God
Dnevni gubitak topline	1 do 5	%
CAPEX	25 – 70	€/kWhth

Kao što prikazuje tablica, učinkovitost same pohrane je visoka, ali ukupna učinkovitost ovisi o primjeni. Ukoliko se sustav koristi za pohranu toplinske energije te kasniju proizvodnju električne energije putem parno- turbinskog ciklusa, dolazi do gubitaka u ovom djelu procesa.

U usporedbi s vodom, rastaljene soli imaju više temperature taljenja te ubog toga je moguće njihovim korištenjem spremi toplinu visoke temperature. U usporedbi s vodom, koja pri atmosferskom tlaku prelazi u vodenu paru iznad 100 °C te ukoliko bi se koristile visoke temperature pohrane, uslijed visokih tlakova zahtjeva veću pažnju pri rukovanju i dodatne zahtjeve za izradu spremnika. Rastaljene soli imaju visoku temperaturu vrenja, nisku viskoznost, tlak pare te visok volumetrički toplinski kapacitet. Kod odabira radne tvari, poželjno je imati što veći raspon između temperature isparavanja i taljenja kako bi se što veća količina energije mogla spremi bez promjene faze radne tvari.

Kapacitet pohrane je ograničen samo zapremninom spremnika te zbog niskih gubitaka topline podložen korištenju na balansiranje na višednevnoj razini.

Tablica 17. Podaci o korištenim rastaljenim solima u sustavima visokotemperaturne pohrane [54]

Tvar	Iznos	Jedinica
Temperatura taljenja	300 – 500	°C
Temperatura isparavanja	800	°C
Toplinski kapacitet	1670 – 3770	kJ/m ³ °C

2.4.1.3. Pohrana u vrućim stijenama ili betonu

Sustav pohrane energije u vrućim stijenama ili betonu (engl „*Rock bed storage*“) se oslanja na pohranu energije u samoj masi materijala koristeći njegov toplinski kapacitet. Kao spremnik topline se mogu koristiti i široko dostupni materijali kao što su stijene ili beton. Slika prikazuje shemu ove vrste pohrane energije. Sustav se sastoji od izvora vrućeg zraka koji može biti izmjenjivač topline u termoelektrani ili električni grijač. Za pohranu se koristi usitnjeni stjenoviti materijal. Potrebno je odabrati materijal dovoljnih mehaničkih svojstava koji može izdržati cikluse promjene temperature te je poželjna što viša temperatura na kojoj može opstati [57]. Ovaj sustav pohrane je pogodan za primjenu kod svih sustava koji zahtijevaju paru za neki od procesa, bilo za proizvodnju električne energije ili za neki od procesa u industriji.

Zagrijani zrak se cirkulira kroz praznine unutar hrpe usitnjenog materijala predajući mu toplinu. Pumpanje zraka kroz usitnjeni materijal uzrokuje značajan pad tlaka te je zbog toga potrebno optimizirati dimenzije pohrane.

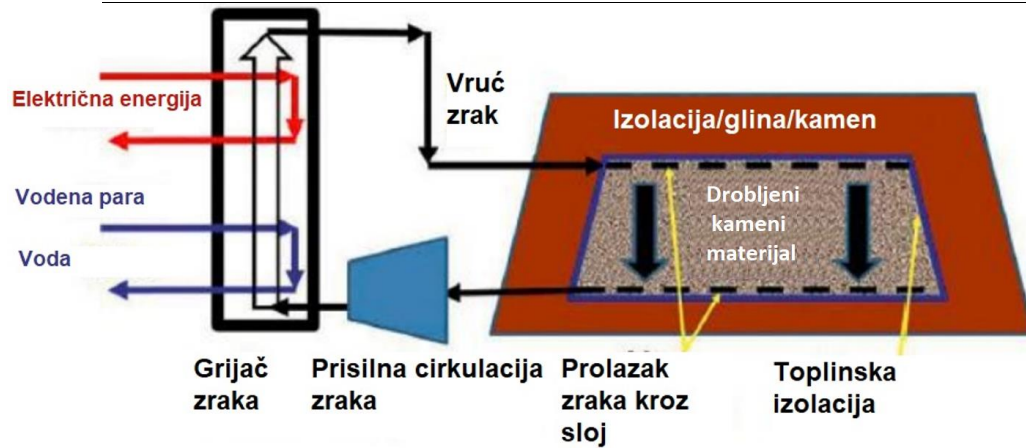
U procesu pražnjenja sustava, proces se odvija u suprotnom smjeru tako da se cirkulira hladan zrak koji se prolaskom kroz sustav zagrijava te naposljetku predaje toplinu radnom mediju u izmjenjivaču topline.

Sama toplinska pohrana dostiže toplinske učinkovitosti u rasponu od 90 do 99 %, ali do gubitaka dolazi uslijed procesa punjenja i pražnjenja sustava. [57]

$$E = A \cdot H \cdot \rho \cdot (1 - \alpha) \cdot c_r \cdot \Delta T \quad (4)$$

Gdje je:

- E – Uskladištena energija
- A – površina sustava
- H – visina sustava
- ρ – gustoća medija
- α – faktor praznina
- c_r – toplinski kapacitet
- ΔT – razlika temperatura

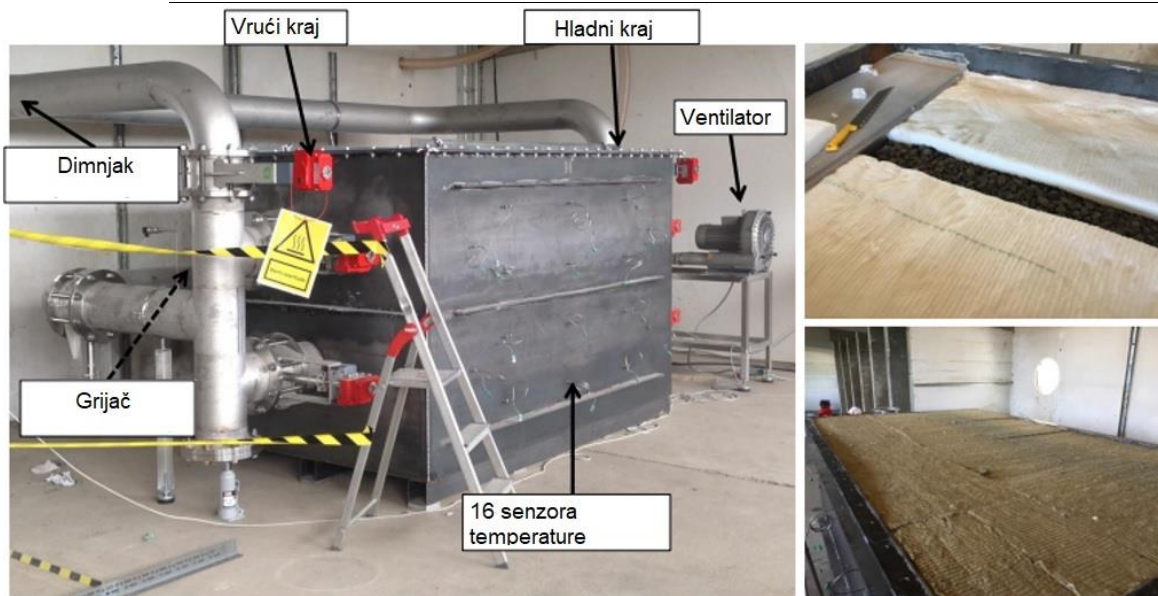


Slika 36. Pohrana u vrućim stjenama

Ukupna učinkovitost sustava uz uključanje gubitaka proizlazi na oko 60 do 70 % [57],[58], a investicijski se trošak kreće između 50 i 150 \$/kW ili do 100 \$/kWh.



Slika 37. Sustav visokotemperaturne pohrane u sloju kamena



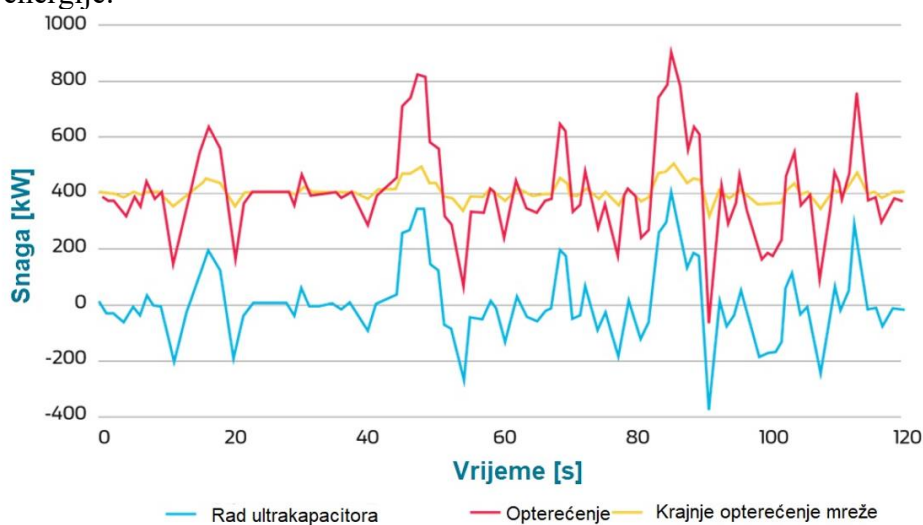
Slika 38. Sustav visokotemperaturne pohrane u sloju kamena

2.5. Električna pohrana energije

Sredstvo pohrane energije u električnom obliku se električni kondenzatori. Glavnina primjene ove metode odgovora potrošnje elektro energetskog sustava je rad u sprezi s drugim sustavom pohrane kao mrežnim baterijama. Kondenzatori pružaju nižu gustoću energije, ali veću snagu i brzinu odgovora u usporedbi s baterijom. Stoga njihova primjena leži u isporučivanju pokrivanju kratkotrajnih vršnih opterećenja, a samim time i osiguravanjem dužeg i pouzdanijeg rada baterijskog sustava pohrane energije [59]. Uslijed niske gustoće energije i visoke stope samopražnjenja, primjena je ograničena na kratkotrajnu pohranu manjih količina energije.

Trenutno se kondenzatorska pohrana energije koristi za isporuku velikih snaga električne energije u kratkom vremenu. Primjerice kod električnih autobusa, vozila pogonjenih vodikom ili kod start stop sustava vozila s motorima s unutrašnjim izgaranjem [60].

Slika 39. prikazuje rezultate primjene kondenzatora u sustavima brzog odgovora potrošnje električne energije.



Slika 39. Rad kondenzatorskog sustava pohrane energije [61]

Iako posjeduju odlične karakteristike odgovora potrošnje, njihova primjena u velikim elektroenergetskim sustavima je upitna. Primjena u sklopu sustava je primjenjivija kod manjih sustava gdje postoji veća potreba za kratkotrajnim balansiranjem varijacija u proizvodnji iz VRES. Dodatni ograničavajući faktor je visoka cijena u iznosu od 20 000 \$/kWh [62].

2.6. Pohrana energije putem supravodiča

Tehnologija skladištenja energije pomoću supravodiča (SMES) oslanja se na činjenicu da tok struje u supravodljivoj zavojnici stvara magnetsko polje pomoću kojeg je moguće pohraniti energiju. SMES pokazuje brz odgovor na potražnju na razini milisekunde, ali je sustav vrlo ograničen u pogledu trajanja usluge tako da odgovor potrošnje može vršiti samo unutar nekoliko sekunda. Ovaj sustav odlikuje učinkovitost od 95%, a tipične instalirane snage sustava iznose između 1 i 10 MW [7], [63].

SMES je prikladan za održavanje stabilnosti napona i kvalitete energije u industrijskim postrojenjima, ali posjeduje visoke troškove prvenstveno uslijed potrebe za supravodljivim materijalima zavojnice [7].

2.7. Elektrokemijska pohrana energije

Elektrokemijska pohrana energije obuhvaća pohranu u električnim baterijama. Na makro razini se razmatraju veliki sustavi s dedicanom namjenom pružanja usluga odgovora potrošnje.

Baterijska pohrana energije omogućuje pohranu energije te na taj način omogućuje integraciju većeg udjela OIE. Prema izvještaju IRENA-e iz 2019., na svjetskoj razini je instalirano 10 GW kapaciteta baterijske pohrane energije [64]. Prednost baterijskih sustava pohrane se očituje u geografskoj fleksibilnosti instalacije samog sustava, tj. Lokacija instalacije nije određena geografskim specifičnostima samog terena. Isti izvještaj procjenjuje da bi do 2025. moglo doći do instalacije dodatnih 80 GW baterijskih kapaciteta. Nivelirani trošak pohrane iznosi između 132 i 245 \$/MWh s očekivanim dodatnim padom uvjetovanim brojnim napretcima u tehnologiji proizvodnje [10].

Slika 40. prikazuje usluge i ulogu baterijskih sustava u energetsom sustavu [62], [60], [65].



Slika 40. Uloga baterijskih sustava pohrane energije [62]

Usluge izmicanja potrošnje

Baterijski sustavi mogu pohraniti energiju u vrijeme niske potrošnje i visoke proizvodnje te ispustiti tu energiju u mrežu u vrijeme visoke potražnje i cijena električne energije

Odgoda investicije u dodatne kapacitete

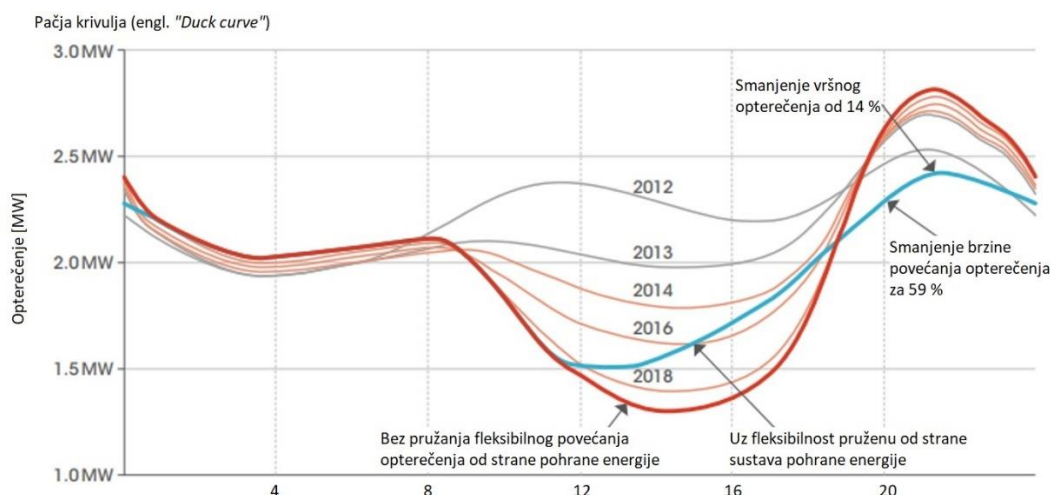
Pomicanje vršne potrošnje te njeno eliminiranje utječe na potrebu za investicijama u proizvodne kapacitete. Smanjenje vršne potrošnje ujedno i smanjuje potrebu za izgradnjom dodatnih postrojenja što smanjuje troškove, ali i CEEP kao mjeru smanjenja proizvodnje iz VOIE uslijed nedostatka potrošnje ili fleksibilnosti mreže.

Regulacija frekvencije

Neusklađenost proizvodnje i potrošnje električne energije može dovesti do pada ili porasta frekvencije mreže izvan sigurnih granica. Usluga regulacije frekvencije je tradicionalno bila pružana od strane termoelektrana. Ovakav način vođenja sustava s visokim udjelom obnovljivih izvora energije može biti neučinkovit i skup. U tom slučaju ta vrsta postrojenja mora biti u pripravnosti velik broj sati ili raditi na niskom opterećenju. Baterijski sustavi pohrane mogu pružiti jednaku uslugu, ali u usporedbi s termoelektranama koje odgovaraju na zahtjev operatora unutar nekoliko sekunda ili minuta, baterijski sustavi pohrane mogu odgovoriti unutar nekoliko milisekunda [62].

Fleksibilan pogon obnovljivih sustava

Uvođenje varijabilnih obnovljivih izvora energije, ponajviše fotonapona, utječe na promjenu izgleda ostatka krivulje opterećenja izuzevši obnovljive izvore. Problem kojim se operateri sustava suočavaju je porast opterećenja u kasnim poslijepodnevним satima. Taj problem se dodatno povećava uz integraciju VOIE jer fotonaponski sustavi izlaze iz pogona u vrijeme povećanja potrošnje. Time se dolazi do takozvane pačje krivulje – (engl: „*duck curve*“). Ostali izvori energije se uslijed toga mogu suočiti s problemima uslijed potrebe za brzim povećanjem proizvodnje. Baterijski sustavi pohrane mogu kao što prikazuje Slika 41. ublažiti potrebno povećanje proizvodnje te smanjiti vršna opterećenja.



Slika 41. Utjecaj uvođenja baterijske pohrane na krivulju opterećenja energetskog sustava [62]

Hladni start

Dodatna mogućnost baterijskog sustava je usluga hladnog starta elektroenergetskog sustava. Većina postrojenja zahtjeva električnu energiju u procesu puštanja u pogon. U slučaju crnog

starta, za tu se potrebu uobičajeno koriste diesel generatori. Baterijski sustavi također mogu pružiti jednaku uslugu.

Smanjenje zagušenja u mreži

Često je uslijed povećanja proizvodnje iz VOIE na udaljenim lokacijama potrebno izgraditi dodatne dijelove prijenosnog sustava kako bi se izbjegla preopterećenja dijelova sustava te mogući kvarovi opreme. Ipak, u slučaju kratkotrajnih povećanja opterećenja, više smisla može imati korištenje pohrane energije kako bi se smanjilo opterećenje mrežne opreme.

Smanjenje kritične proizvodnje električne energije

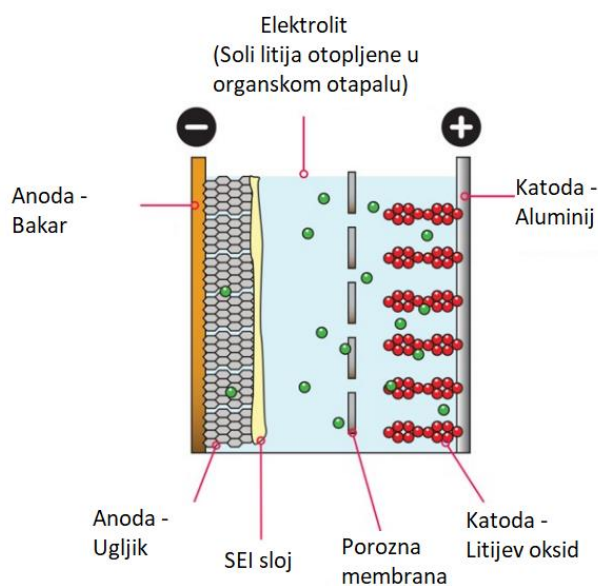
Pohrana energije omogućuje učinkovitiji rad VOIE te smanjuje potrebu za smanjenjem proizvodnje što smanjuje njihov faktor opterećenja. Tj. Sprečava se povećanje kritične proizvodnje električne energije.

Balansiranje sustava i smanjenje vršnih opterećenja

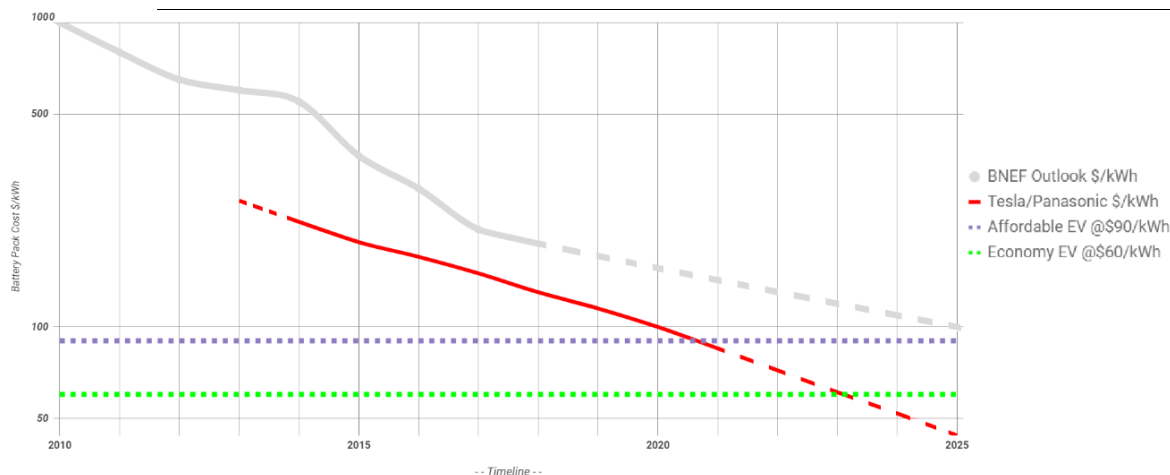
Uparivanje VOIE s baterijskom pohranom pruža mogućnosti peglanja proizvodnje te time osiguravanje stabilne proizvodnje

2.7.1. Litij-ionske baterije

Litij-ionske baterije su najrasprostranjenija vrsta baterija. Slika 42. prikazuje shematski prikaz i proces rada baterije.



Slika 42. Shematski prikaz procesa Litij – ionskih baterija [2]



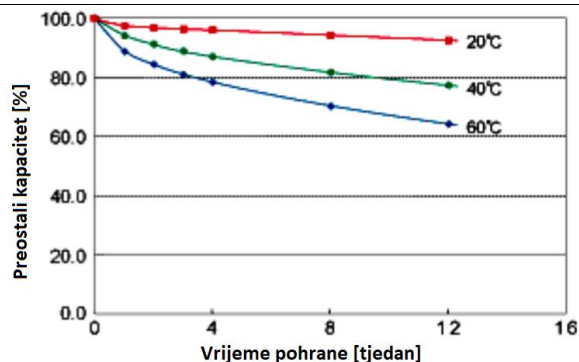
Slika 43. Projekcija cijena litij ionskih baterija [2]

Kao što prikazuje Slika 43, postoji velika doza nesigurnosti o kretanju cijena baterija. Tako primjerice vodeći dijelovi industrije kao što je Tesla predviđaju pad ispod 50 USD/kWh već 2024. dok ostatak industrije kasni najmanje 5 godina. Ipak, predviđa se sa 90 % sigurnosti pad cijena do 2050. u raspon između 30 i 75 USD/kWh.

Tablica 18. Podaci o vrstama litij ionskih baterija [2]

Naziv	Materijal anode	Materijal katode	Gustoća energije	Broj ciklusa	Životni vijek	Proizvođači
			Wh/kg	n	god	
NMC	Grafit	Li Ni _{0,6} Co _{0,2} Mn _{0,2} O ₂	120-300	3000-10000	10-20	Samsung SDI LG Chem SK Innovation Leclanche Kokam
LFP	Grafit	LiFePO ₄	50-130	6000-8000	10-20	BYD/Fenecon Fronius/Sony
LTO	LiTO ₂	LiFePO ₄ ili Ni _{0,6} Co _{0,2} Mn _{0,2} O ₂	70-80	15000-20000	25	Leclanche Kokam Altairnano

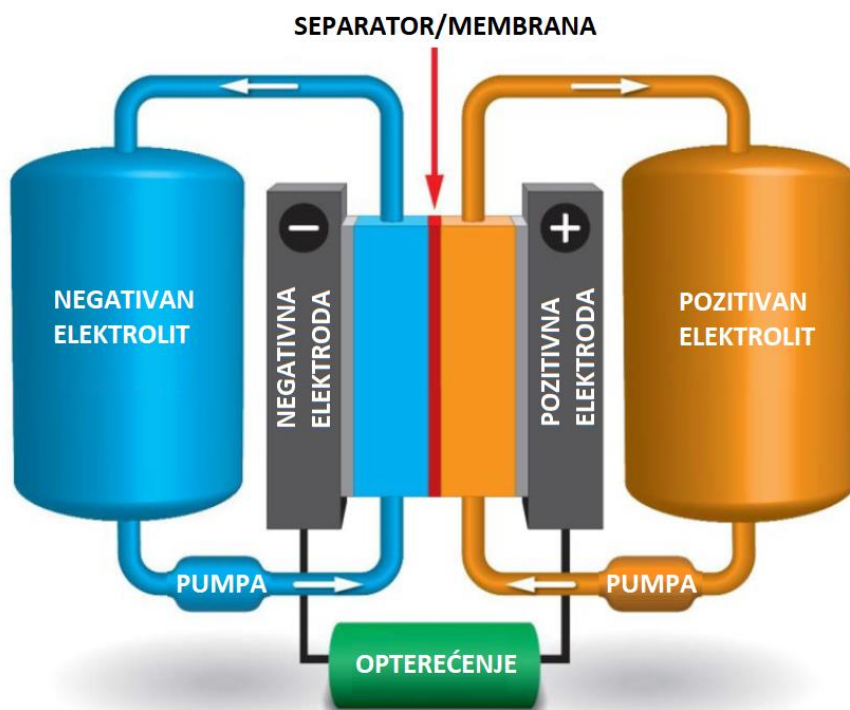
Potrebno je napomenuti da baterijska pohrana energije nije optimalna za dugoročnu pohranu energije uslijed pojave samopražnjenja. Ovaj problem može biti još izraženiji u slučaju visokih ili niskih temperatura kad je potreban utrošak određenog dijela energije za potrebe grijanja ili hlađenja baterijskih ćelija. Samopražnjenje u ovisnosti o vremenu stajanja i temperaturi unutar samih ćelija prikazuje Slika 44.



Slika 44. Samopražnjenje baterijskog sustava pohrane energije

2.7.2. Vanadij-redoks baterije

Ova vrsta baterija pripada u skupinu „tekućih“ baterija. Jedan od spremnika predstavlja pozitivnu stranu dok drugi predstavlja negativnu stranu baterije. Materijal spremljen u oba spremnika je u tekućem stanju te se reakcija odvija na središnjoj membrani. Sam koncept baterije je u ovoj primjeni drugačiji jer je sustav pohrane i sustav punjenja/pražnjenja fizički odvojen. Tako se može primjerice promjenom veličine spremnika podesiti kapacitet pohrane energije dok se promjenom kapaciteta membrane na kojoj se odvija reakcija može podesiti dostupna snaga baterije.



Slika 45. Vanadij-redoks baterija [2]

Specifična energija ove vrste baterija je niskih 7 do 12 Wh/kg što je niže od litij -ionskih baterija sa 50 do 300 Wh/kg. Prednost ove vrste je mogućnost dugotrajnog skladištenja energije i odsustvo problema degradacije kapaciteta. Također, mogućnost brzog odgovora potrošnje je prisutna i u ovoj vrsti baterija.

Usprkos niskoj gustoći energije, ova vrsta baterije ima najnižu niveliranu cijenu energije od 70 USD/kWh [10]. U prilog dolazi i veće dostupne količine Vanadija u usporedbi s Litijem te jednostavnost recikliranja.

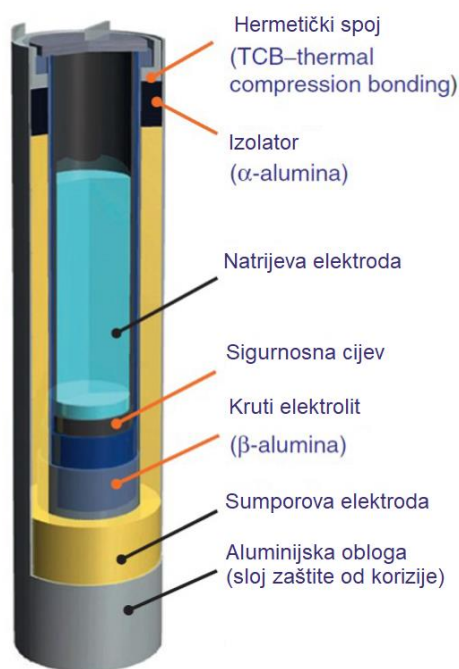
Tablica 19. Financijski podaci [2]

Godina	2015	2020	2030	2050
Jedinica	M€/MWh	M€/MWh	M€/MWh	M€/MWh
Specifična investicija	0,75	0,6	0,35	0,33

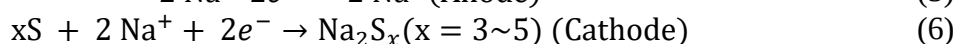
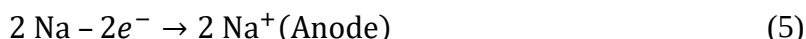
2.7.3. Na-S baterije

Na-S baterije se sastoje od anode od rastaljenog natrija, katode od rastaljenog sumpora i krutog β -aluminij oksid elektrolita (BASE).

Specifičnost ove vrste baterije je potreba za radom na visokim temperaturama (300-350 °C) kako bi se zadržala tražena svojstva i omogućila reakcija unutar baterije. Uslijed visokih temperatura, dolazi i do toplinskih gubitaka od oko 1 %/h. Stoga, ova vrsta baterija nije pogodna za dugoročnu pohranu energije. Kod primjene na kratkotrajnoj pohrani, učinkovitost se kreće između 83 i 89 %. Vremensko razdoblje pohrane se kreće između 6 i 8 sati. Moguć je brz odaziv unutar jedne milisekunde te prema potrebi i kratkotrajna isporuka do 600 % nazivne snage uz uvjet da ostala priključna infrastruktura može podnijeti tu razinu opterećenja. Proizvođači također ističu mogućnost promjene rada sustava iz punjenja pri 100 % nazivne snage do pražnjenja pri 100 % nazivne snage i suprotno unutar 50 ms.

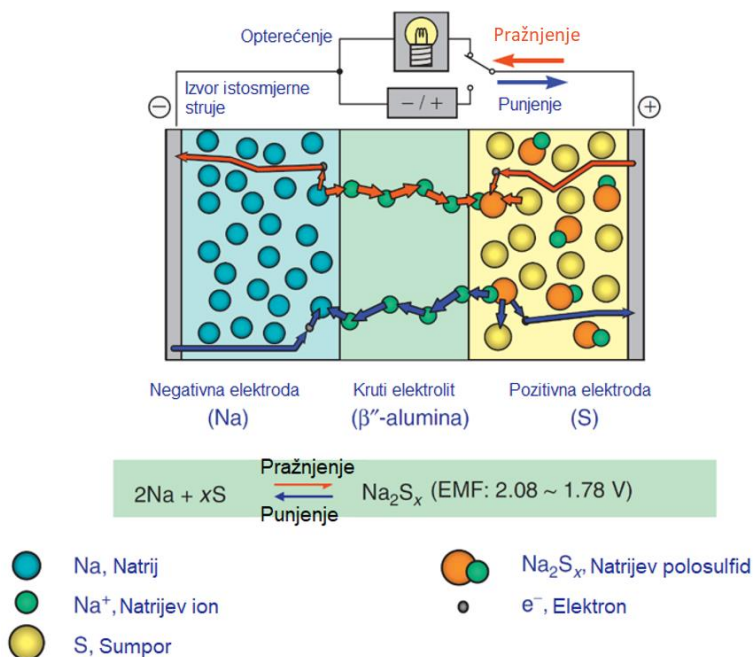


Slika 46. Na-S baterija



Slika 46. prikazuje shematski prikaz baterije, dok je proces unutar same baterije prikazan putem jednadžba (5) i (6) te Slika 47. U sredini baterije se nalazi rastaljena natrijeva elektroda okružena elektrolitom na cilindričnoj stjenici, dok se s vanjske strane nalazi rastaljena sumporova elektroda. Električni spoj je ostvaren putem vrha/dna prostora ispunjenog

natrijevome elektrodom. Tablica 20. prikazuje očekivano sniženje investicijskih troškova u odnosu na sadašnje stanje za gotovo 50 % do 2050.



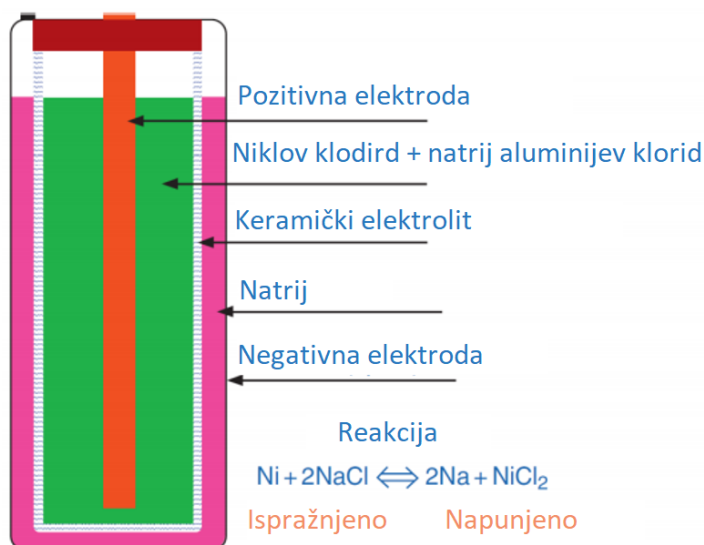
Slika 47. Shematski prikaz

Tablica 20. Financijski podaci [2]

Godina	2015	2020	2030	2050
Jedinica	M€/MWh	M€/MWh	M€/MWh	M€/MWh
Specifična investicija	0,46	0,37	0,23	0,20

2.7.4. Na-NiCl₂ baterije

Ova vrsta baterija također sadržava rastaljenu jezgru od natrija. Slika 48. daje shematski prikaz strukture baterije. Primjena je jednoliko učestala i prigoda u sustavima s potrebom za visokim priključnim snagama kao i kod potrebe za visokim kapacitetima skladištenja. Stoga, prigodne su i za mrežnu pohranu kao i za manje aplikacije kao što su primjerice električna vozila.



Slika 48. shematski prikaz Na-NiCl₂ baterije

Brzina punjenja je manja od brzine pražnjenja baterije. Primjerice baterija deklariranog kapaciteta iskazanog u duljini pražnjenja od 3 sata zahtjeva 6 do 8 sati neprekidnog punjenja. Veće brzine punjenja je moguće postići, ali uz veće gubitke energije te degradaciju same baterije. Vrijeme odaziva baterije je ispod 1 ms kod kontinuiranog rada baterije, dok je za postizanje zahtijevane snage punjenja ili pražnjenja potrebno do 20 ms. Situacija je drugačija kad se baterija dovodi u radno stanje jer je potrebno zagrijati natrijevu jezgru te vrijeme početnog odgovora iznosi oko 45 s. Ova vrsta baterije također može isporučiti pulse energije značajno iznad nazivne snage. U ovom slučaju do 300 % nazivne snage u trajanju do 30 s.

Uslijed korištenja zagrijanih dijelova kao što je rastaljena natrijeva jezgra, postoje gubitci energije te se baterija koristi samo za kratkotrajnu pohranu energije koja može varirati od nekoliko minuta do nekoliko sati. Iako sama baterija sadrži izrazito reaktivan rastaljeni natrij, pripada među najsigurnije baterije zbog mnogih sigurnosnih mehanizama [66].

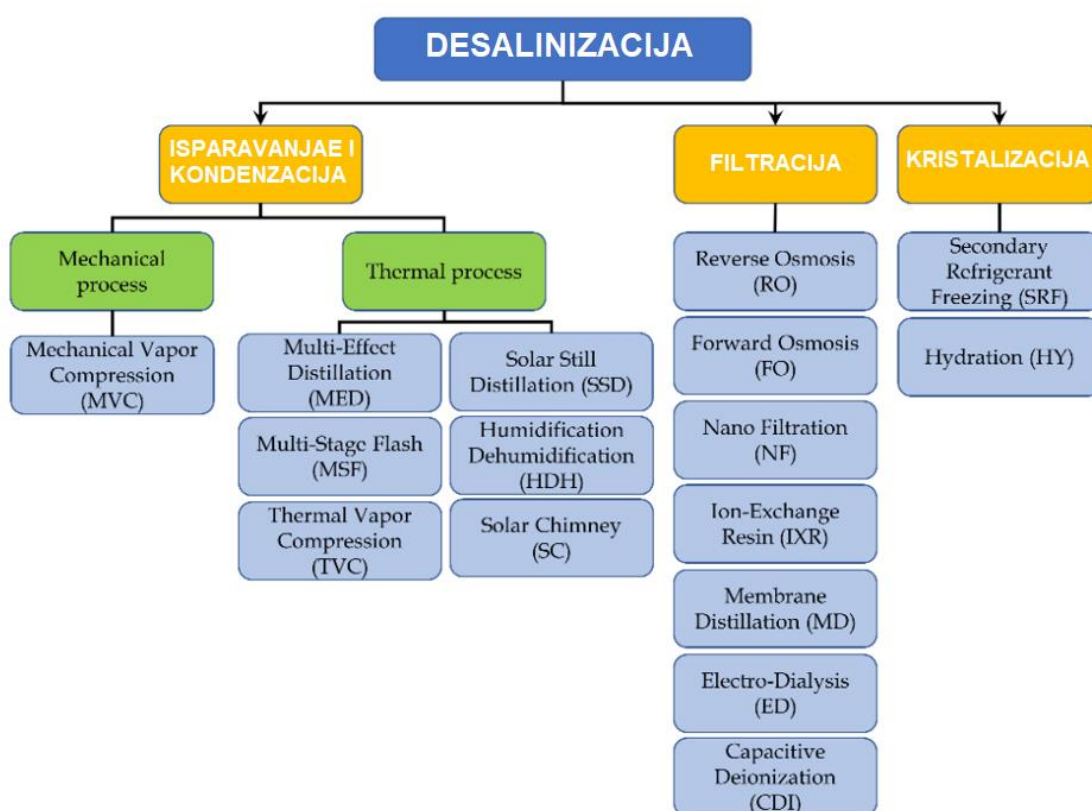
Tablica 21. Investicijski podaci o bateriji [2]

Godina	2015	2020	2030	2050
Jedinica	M€/MWh	M€/MWh	M€/MWh	M€/MWh
Specifična investicija	1,0	0,42	0,26	0,23

3. Sustavi desalinizacije

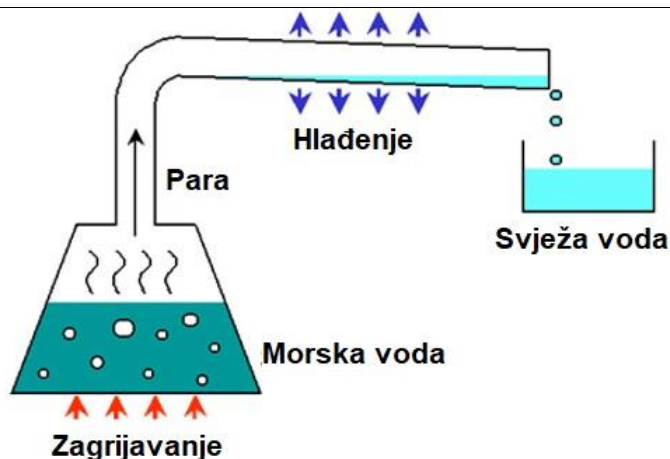
Desalinizacija se odnosi se na uklanjanje soli/minerala iz pojne vode pri čemu se kao produkt dobiva voda koja može služiti za osobnu konzumaciju i/ili za poljoprivredne potrebe te određeni nusprodukt. Pojna voda (engl: „*Feedwater*“) u procesu desalinizacije može biti morska, bočata, riječna, voda iz otpadnih tokova ili procesna voda. Postrojenje za desalinizaciju se sastoji od 4 djela:

- Ulaz pojne vode
- Predobrada – sastoji se od filtracije vode te se otklanjaju krute tvari, a u vodu se dodaju spojevi koji smanjuju djelovanje soli na koroziju unutar dijelova postrojenja.
- Proces desalinizacije
- Završna obrada kontrole pH vrijednosti vode dodatkom određenih soli kako bi se postigla zahtijevana pH vrijednost



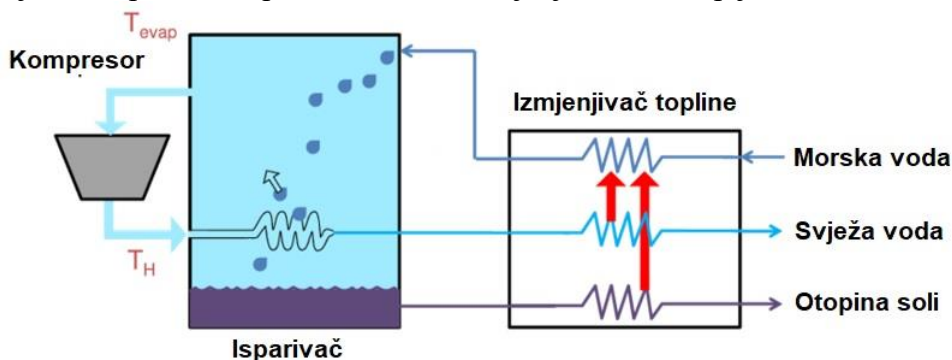
Slika 49. Procesi desalinizacije [67]

Trenutno se proces desalinizacije može provesti na nekoliko načina. Procesi desalinizacije se mogu podijeliti na 3 osnovne grupe. Prva grupa podrazumijeva korištenje termodinamičkih načela te izdvajanje vode isparavanjem te kondenzacijom u odvojenu posudu. To je ujedno i prva korištena vrsta tehnologije. Voda zasićena solima se zagrijava korištenjem izvora topline do isparavanja te se vodena para kondenzira. Ovaj proces je često bio korišten primjerice u pomorstvu uz prisutnost velikih količina otpadne toplinske energije. Također, često se koristi i kod ostalih izvora otpadne topline kao što su rafinerije nafte. Ovaj proces zahtjeva dovodenje vode do stanja vrelišta što može zahtijevati velike količine energije. Ipak, uz provedbu sustava pri manjenom tlaku se potrebna količina energije smanjuje.



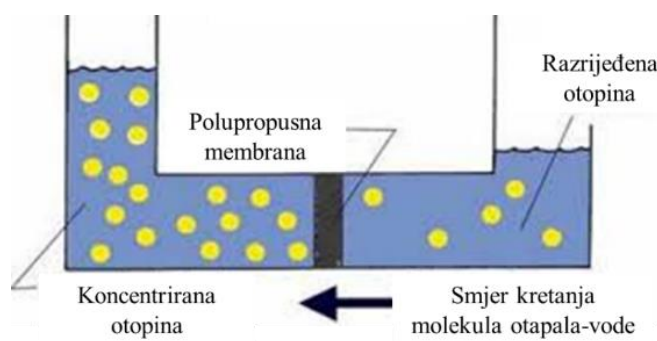
Slika 50. termalni princip desalinizacije [68]

Parni proces kompresije također pripada u skupinu procesa isparavanja i kondenzacije. Koristi se sličan princip kao i kod termalne desalinizacije, ali se postiže na drugačiji način. Zagrijavanje se provodi kompresijom vodene pare koja zatim kondenzira. Cijeli proces se ponavlja jer pregrijana vodena para predaje toplinu zasićenoj vodi u isparivaču putem izmjenjivača topline što opet dovodi do izdvajanja vode i otopljenih soli.



Slika 51. Desalinizacija procesom kompresije para [69]

Trenutno najzastupljenija metoda desalinizacije je filtracija. Tehnologije se baziraju na polupropusnim membranama, tj. slojem koji onemogućuje prolaz molekula iznad određene veličine. Jedina iznimka ovom pravilu je sustav koji koristi ionske izmjenjivače (IXR) gdje se molekule soli hvataju kemijskim, a ne fizikalnim putem. Kako bi se održao protok, potrebno je narinuti dovoljan tlak na ulaznoj strani. Fizikalni princip koji se koristi u ovom procesu je proces osmoze. Osmoza je naziv za spontani proces prelaska molekula otapala (vode) iz razrijeđene otopine (otopine u kojoj ima manje otopljenih tvari, a više otapala-vode) u koncentriranu otopinu (otopinu u kojoj ima više otopljenih tvari, a manje otapala) kroz polupropusnu membranu s ciljem izjednačavanja koncentracija.



Slika 52. Princip osmoze [70]

Osmotski tlak naziv je za tlak koji molekule otapala (najčešće se voda gleda kao otapalo) izazivaju u procesu osmoze na polupropusnoj membrani. Osmotski tlak može se izračunati prema van't Hoffovom zakonu za otopine elektrolita (3):

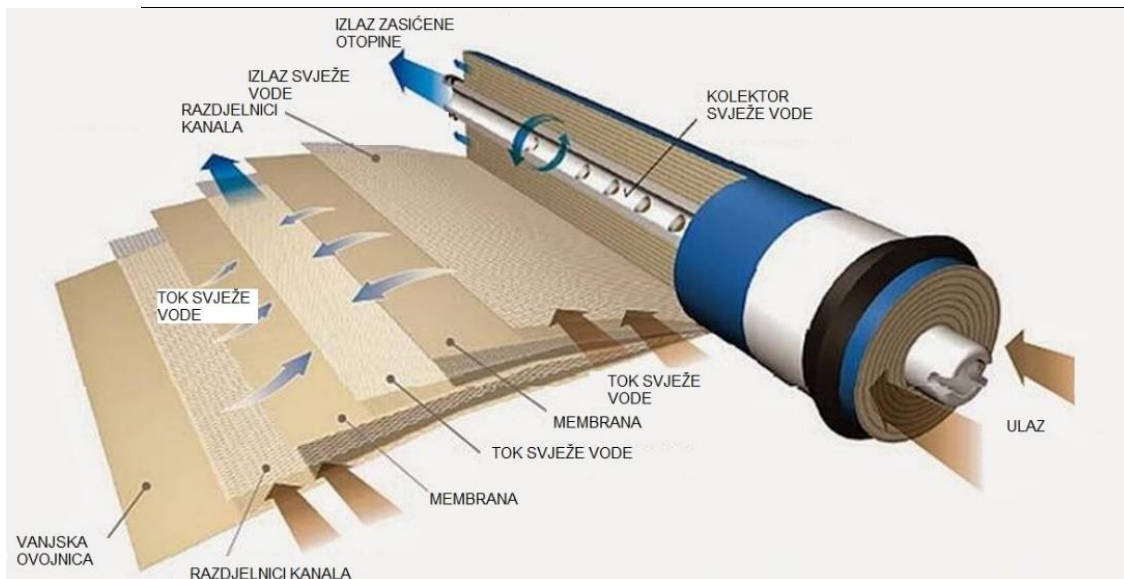
$$\pi = i \Phi C R T \quad (3)$$

Gdje je:

- π – osmotski tlak, Pa
- i – broj iona nastalih disocijacijom ionskih oblika,
- Φ – osmotski koeficijent (korekcijski faktor)
- c – koncentracija otopine, mol/m³
- R – univerzalna konstanta, 8,314 J/(mol K)
- T – termodinamička temperatura, K.

Osmotski tlak ovisi o svojstvima otopljenih tvari, koncentraciji otopljenih tvari u otopini te o temperaturi.

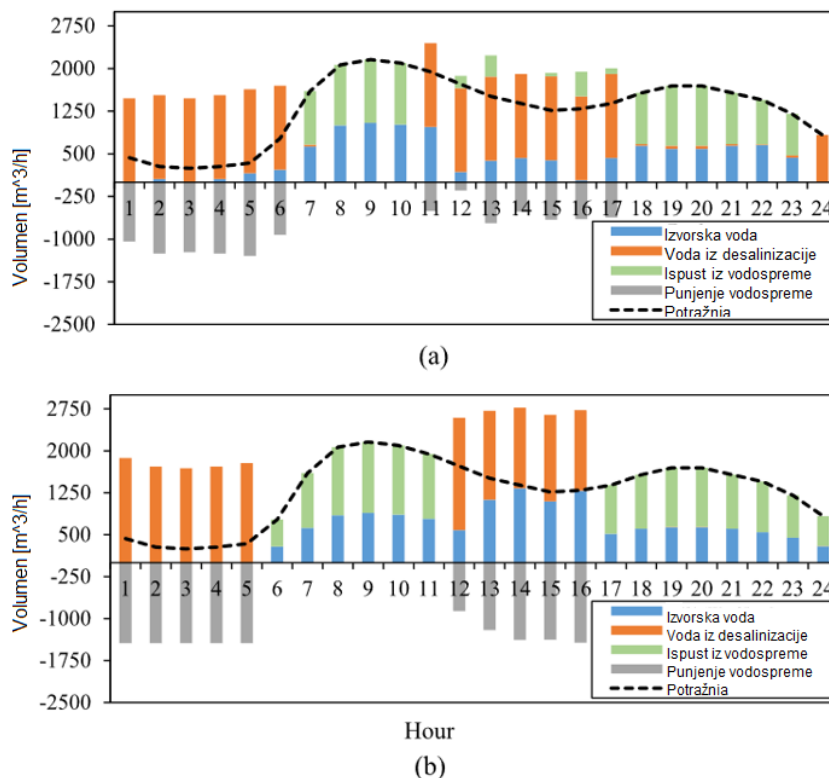
Najčešće korišteni sustav je sustav povratne osmoze koji je shematski prikazan na Slika 53. Desalinizacijska postrojenja s naglaskom na povratnu osmozu koriste set opreme koji uključuju i pumpe.



Slika 53. Sustav povratne osmoze [71]

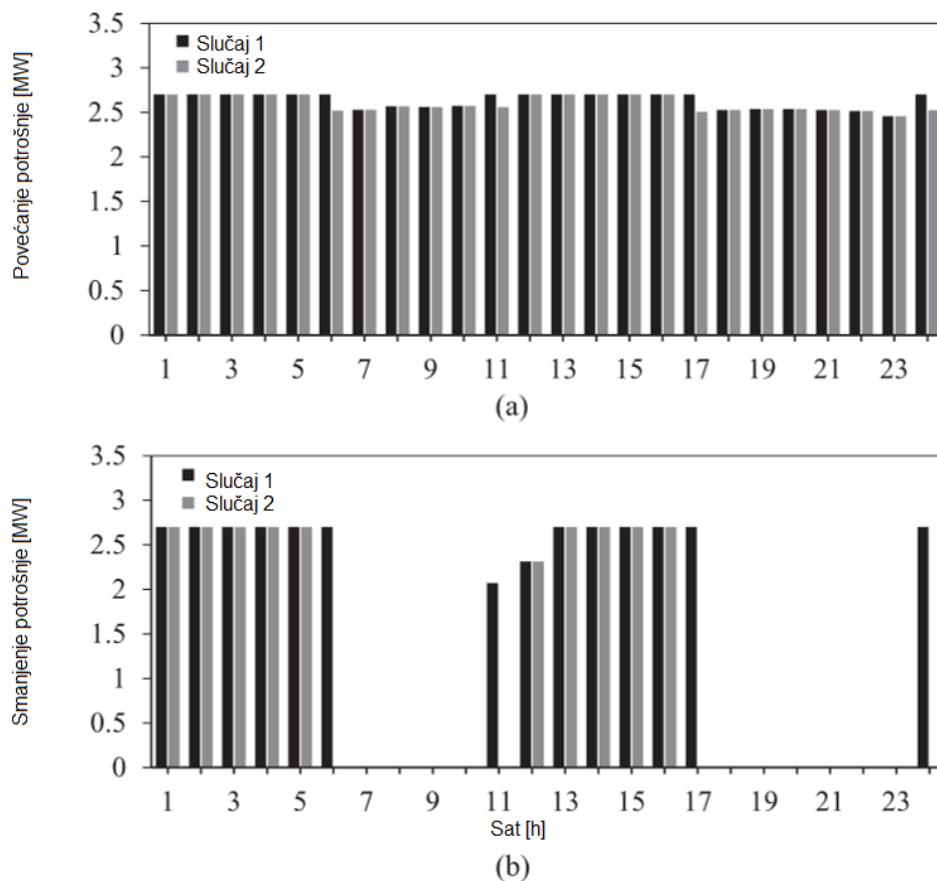
Treća grupa tehnologija pripada tehnologijama kristalizacije. Ovaj proces funkcionira na temelju izdvajanja soli i vode pri formaciji leda čijim se taljenjem dobiva pitka voda.

S obzirom na opterećenje sustava, postoji određena mjera dostupne fleksibilnosti pri povećanju ili smanjenju opterećenja. Slika 54. prikazuje dnevnu razdiobu opterećenja sustava pripreme pitke vode. Vidljivo je da potrebe značajno variraju tokom dana, a samim time i potreba za radom desalinizacijskog postrojenja. Prikazana su dva slučaja rada sustava. U prvom slučaju postrojenje sudjeluje na tržištu električne energije samo uz fleksibilno korištenje pumpa i vodospreme, dok u drugom slučaju koristi i fleksibilan pogon sustava desalinizacije.



Slika 54. Opterećenje sustava pripreme pitke vode, slučaj 1 (a) i slučaj 2 (b) [72]

Slika 55. prikazuje dostupno povećanje ili smanjenje snage koju koristi desalinizacijsko postrojenje u svrhu pružanja usluga odgovora potrošnje. Postrojenje nikad ne radi na punoj snazi pa preostaje uvijek dostupna rezerva povećanja snage, dok potencijal smanjenja postoji u periodima izvan vršnog opterećenja vodoopskrbnog sustava. Daljnja fleksibilizacija sustava je moguća implementacijom sustava pohrane vode.



Slika 55. Proces desalinizacije te mogućnosti promjene opterećenja postrojenja u smislu pružanja usluga odgovora potrošnje [72]

Tablica 22. prikazuje razdiobu mogućih profita uz pružanje usluga odgovora potrošnje kod postrojenja desalinizacije na dnevnoj razini. Korištenjem i samog sustava desalinizacije se ostvaruju veći prihodi od usluga odgovora potrošnje.

Tablica 22. Financijski osvrt na uvođenje odgovora potrošnje u postrojenjima desalinizacije, [72]

Stavka	Jedinica	Slučaj 1	Slučaj 2
Zarada od usluga odgovora potrošnje	\$	667,6	974,6
Pružanje dodatne potrošnje	\$	400,7	396,5
Pružanje smanjenja potrošnje	\$	293,2	222,2
Nadoknada rada	\$	191,0	297,4
Prihod od odgovora potrošnje	\$	476,6	677,2
Prihod od usluga regulacije	\$	693,9	618,7
Ukupan prihod	\$	1170,5	1295,9

Sustavi desalinizacije se također razlikuju prema utrošku energije koja pak može značajno varirati u ovisnosti o veličini sustava te vrsti vode koja se koristi. Specifičnu potrošnju energije sustava desalinizacije prikazuje Tablica 23.

Tablica 23. Utrošak energije različitih sustava desalinizacije, [73]

Tehnologija	Utrošak energije [kWh/m ³]
Parna kompresija	7 – 17,5
Elektrodijaliza	0,6 – 5,5
Povratna osmoza (morska voda)	2,5 – 7,5
Povratna osmoza (bočata voda)	0,5 - 3
Višestupanjsko isparavanje	15 - 30

LITERATURA

- [1] Stadler, I.; Sterner, M.; 2.3 -Urban Energy Storage and Sector Coupling, Editor(s): Peter Droege, Urban Energy Transition (Second Edition), Elsevier, 2018, Pages 225-244, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102074-6.00026-7>
- [2] Podaci o sustavima pohrane energije, Danska Energetska Agencija, dostupno na: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_catalogue_for_energy_storage.pdf
- [3] Amiryar, M.E.; Pullen, K.R. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. Appl. Sci. 2017, 7, 286. <https://doi.org/10.3390/app7030286>
- [4] Liu H.; Jiang J.; Flywheel energy storage—An upswing technology for energy sustainability, Energy and Buildings, Volume 39, Issue 5, 2007, Pages 599-604, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.10.001>.
- [5] Sustav pohrane energije u zamašnjaku, dostupno na: <https://www.energydigital.com/smart-energy/worlds-largest-flywheel-energy-storage-system>
- [6] Bolund B.; Bernhoff H.; Leijon M.; Flywheel energy and power storage systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 11, Issue 2, 2007, Pages 235-258, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.01.004>.
- [7] Chen, Haisheng, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, and Yulong Ding. 2009. —Progress in Electrical Energy Storage System: A Critical Review. Progress in Natural Science 19 (3): 291–312. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>
- [8] Korištenje zamašnjaka u regulaciji elektroenergetskog sustava, https://www.sandia.gov/ess-ssl/docs/pr_conferences/2010/arseneaux.pdf
- [9] Chen H.; Zhang X.; Liu J.; Tan C.; Compressed Air Energy Storage, <http://dx.doi.org/10.5772/52221>
- [10] Lazard. 2016. —Lazard's Levelized Costs of Storage Analysis-Version 2
- [11] Sustav stlačenog zraka, dostupno na: https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_ACAES.pdf
- [12] Budt, Marcus, Daniel Wolf, Roland Span, and Jinyue Yan. 2016. —A Review on Compressed Air Energy Storage: Basic Principles, Past Milestones and Recent Developments. Applied Energy. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.108>
- [13] Liu, Hui, Qing He, Andrea Borgia, Lehua Pan, and Curtis M Oldenburg. 2016. —Thermodynamic Analysis of a Compressed Carbon Dioxide Energy Storage System Using Two Saline Aquifers at Different Depths as Storage Reservoirs. Energy Conversion and Management 127: 149–59. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.096>.
- [14] Yao, Jinduo, Yukun Hu, Shengchun Liu and Hailong Li. “An Experimental Study on Compressed Carbon dioxide Energy Storage.” DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Science (2019): n. pag.
- [15] Luo, Xing, Jihong Wang, Mark Dooner, and Jonathan Clarke. 2015. —Overview of Current Development in Electrical Energy Storage Technologies and the Application Potential in Power System Operation. Applied Energy 137: 511–36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>.
- [16] Morgan, Robert, Stuart Nemes, Emma Gibson, and Gareth Brett. 2015. —Liquid Air Energy Storage - Analysis and First Results from a Pilot Scale Demonstration Plant. Applied Energy. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.109>.
- [17] Williams R. A.; Radcliffe J.; Strahan D.; Liquid air in the energy and transport systems

- [18] ARES gravitacijski sustav pohrane energije, dostupno na: https://s3.amazonaws.com/siteninja/multitenant/assets/21125/files/original/All_About_ARES_-_070616.pdf
- [19] Gravitacijski sustav pohrane energije, Gravitricity, dostupno na: <https://www.gravitricity.com/>
- [20] Gravitacijska pohrana energije, dostupno na: <http://euanmearns.com/short-term-energy-storage-with-gravitricity-iron-versus-ion/>
- [21] Berrada, Asmae, Khalid Loudiyi, and Izeddine Zorkani. 2017. —System Design and Economic Performance of Gravity Energy Storage. Journal of Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.043>
- [22] Ruoso, Ana Cristina, Nattan Roberto Caetano, and Luiz Alberto Oliveira Rocha. 2019. —Storage Gravitational Energy for Small Scale Industrial and Residential Modelling of variability, EROI, and energy intensity 118 /140 Applications. Inventions. <https://doi.org/10.3390/inventions4040064>
- [23] International Hydropower Association. 2020. —2020 Hydropower Status Report.
- [24] Reverzibilne hidroelektrane, dostupno na: <https://www.ourworldofenergy.com/vignettes.php?type=other-renewables-energy&id=10>
- [25] Baza podataka o postrojenjima za proizvodnju električne energije i toplinske energije, dostupno na: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Statistik/technology_data_catalogue_for_el_and_dh_-_0009.pdf
- [26] Šćekić, L.; Mujović, S.; Radulović, V. Pumped Hydroelectric Energy Storage as a Facilitator of Renewable Energy in Liberalized Electricity Market. Energies 2020, 13, 6076. <https://doi.org/10.3390/en13226076>
- [27] Odgovor potrošnje elektrolizatora, dostupno na: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/06/f34/fcto_may_2017_h2_scale_wkshp_hovsapian.pdf
- [28] Schmidt O.; Gambhir A.; Staffell I.; Hawkes A.; Nelson J.; Few S.; Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 52, 2017, Pages 30470-30492, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>.
- [29] Smolinka, T., G€unther, M., Garche, J., 2011. Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien: NOW-Studie. Fraunhofer ISE, FCBAT, Freiburg.
- [30] Bourasseau, Cyril, and Benjamin Guinot. "Hydrogen: a storage means for renewable energies." Hydrogen Production 8 (2015)
- [31] Selamet, Ö., Acar, M., Mat, M., and Kaplan, Y. (2013) Effects of operating parameters on the performance of a highpressure proton exchange membrane electrolyzer. Int. J. Energy Res., 37, 457–467.
- [32] Baza podataka o obnovljivim gorivima, dostupno na: https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/technology_data_for_renewable_fuels.pdf
- [33] Vidyanandan K. V., Hydrogen: The Future Energy Carrier for Sustainable Development, https://www.researchgate.net/publication/298346286_Hydrogen_The_Future_Energy_Carrier_for_Sustainable_Development
- [34] Kovač A.; Paranos M.; Marcuš D.; Hydrogen in energy transition: A review, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 46, Issue 16, 2021, Pages 10016-10035, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.256>.

- [35] Hydrogen storage and compression, Makridis S. S., dostupno na: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1702/1702.06015.pdf>
- [36] DOE, Hydrogen and Fuel Cells Program Record, dostupno na: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf
- [37] Steilen M.; Jörisen L.; Chapter 10 - Hydrogen Conversion into Electricity and Thermal Energy by Fuel Cells: Use of H₂-Systems and Batteries, Editor(s): Patrick T. Moseley, Jürgen Garche, Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing, Elsevier, 2015, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62616-5.00010-3>.
- [38] Couto N.; Rouboa A.; Silva V.; Monteiro E.; Bouziane K.; Influence of the Biomass Gasification Processes on the Final Composition of Syngas, Energy Procedia, Volume 36, 2013, Pages 596-606, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.068>.
- [39] Wang F.; Deng S.; Zhang H.; Wang J.; Zhao J.; Miao H.; Yuan J.; Yan J.; A comprehensive review on high-temperature fuel cells with carbon capture, Applied Energy, Volume 275, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115342>.
- [40] Mikulčić H.; Skov I. R.; Dominković D. F.; Alwi S. R. W.; Manan Z. A.; Tan R.; Duić N.; Mohamad S. N. H.; Wang X.; Flexible Carbon Capture and Utilization technologies in future energy systems and the utilization pathways of captured CO₂, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 114, 2019, 109338, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109338>.
- [41] Gambhir A.; Tavoni M.; Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation, One Earth, Volume 1, Issue 4, 2019, Pages 405-409, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.11.006>.
- [42] Castellani, B.; Gambelli, A.M.; Morini, E.; Nastasi, B.; Presciutti, A.; Filippini, M.; Nicolini, A.; Rossi, F. Experimental Investigation on CO₂ Methanation Process for Solar Energy Storage Compared to CO₂-Based Methanol Synthesis. Energies 2017, 10, 855. <https://doi.org/10.3390/en10070855>
- [43] Use of hydrogen as an energy storage system, dostupno na: <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/use-of-hydrogen-as-an-energy-storage-system>
- [44] Ding X.; Sun W.; Harrison G. P.; Lv X.; Weng Y.; Multi-objective optimization for an integrated renewable, power-to-gas and solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system in microgrid, Energy, Volume 213, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118804>.
- [45] Pérez, S., Aragón, J.J., Peciña, I. *et al.* Enhanced CO₂ Methanation by New Microstructured Reactor Concept and Design. *Top Catal* **62**, 518–523 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11244-019-01139-4>
- [46] EnergyPLAN Cost database, <https://www.energyplan.eu/>
- [47] Cheema I. I.; Krewer U.; Operating envelope of Haber–Bosch process design for power-to-ammonia, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2018/ra/c8ra06821f>
- [48] Gjorgievski V. Z.; Markovska N.; Abazi A.; Duić N.; The potential of power-to-heat demand response to improve the flexibility of the energy system: An empirical review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 138, 2021, 110489, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110489>.
- [49] Budt, Marcus, Daniel Wolf, Roland Span, and Jinyue Yan. 2016. —A Review on Compressed Air Energy Storage: Basic Principles, Past Milestones and Recent Developments. Applied Energy. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.108>.
- [50] Energetika net, akumulator topline, <http://www.energetika-net.com/vijesti/instalacije-termotehnika-i-voda/akumulator-topline-uskoro-u-novom-ruhu-23511>

- [51] Bloess A.; Schill W.-P.; Zerrahn A.; Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials, *Applied Energy*, Volume 212, 2018, Pages 1611-1626, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.073>.
- [52] Pfeifer A.; Herc L.; Bjelić I. B.; Duić N.; Flexibility index and decreasing the costs in energy systems with high share of renewable energy, *Energy Conversion and Management*, Volume 240, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114258>.
- [53] Glensk B.; Madlener R.; The value of enhanced flexibility of gas-fired power plants: A real options analysis, *Applied Energy*, Volume 251, 2019, 113125, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.121>.
- [54] Sustavi pohrane energije, dostupno na: <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph240/dodaro2/>
- [55] R. P., P. Performance Analysis and Optimization of Central Receiver Solar Thermal Power Plants for Utility Scale Power Generation. *Sustainability* 2020, 12, 127. <https://doi.org/10.3390/su12010127>
- [56] Solarni sustavi pohrane energije, dostupno na: <https://www.solarthermalworld.org/news/molten-salt-storage-33-times-cheaper-lithium-ion-batteries>
- [57] Crushed Rock Thermal Energy Storage & Nuclear Technology: Option Space& Economic Impacts, Nathaniel Ross McLauchlan B.S., Chemistry, United States Naval Academy, 2016, <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/117794/1051222856-MIT.pdf?sequence=1>
- [58] Forsberg C.; Brick S.; Haratyk G.; Coupling heat storage to nuclear reactors for variable electricity output with baseload reactor operation, *The Electricity Journal*, Volume 31, Issue 3, 2018, Pages 23-31, <https://doi.org/10.1016/j.tej.2018.03.008>.
- [59] Sustavi pohrane energije, dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/328023430_Energy_storage
- [60] Ultrakondenzatori, dostupno na: <https://www.electronics-tutorials.ws/capacitor/ultracapacitors.html>
- [61] Odgovor potražnje ultrakondenzatora, dostupno na: <https://www.skeletontech.com/skeleton-blog/ultracapacitors-balance-gradients-and-smooth-genset-power>
- [62] Beaudin, Marc, Hamidreza Zareipour, Anthony Schellenberg, and William Rosehart. 2010. —Energy Storage for Mitigating the Variability of Renewable Electricity Sources: An Updated Review. *Energy for Sustainable Development* 14 (4): 302–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.09.007>.
- [63] Mukherjee, Poulomi, and V V Rao. 2019. —Design and Development of High Temperature Superconducting Magnetic Energy Storage for Power Applications - A Review. *Physica C: Superconductivity and Its Applications* 563: 67–73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.05.001>
- [64] Mrežni baterijski sustavi pohrane energije, dostupno na: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Utility-scale-batteries_2019.pdf
- [65] Elektrokemijski sustavi pohrane energije, dostupno na: <https://www.seas.ucla.edu/~pilon/EES.html>
- [66] C.-H. Dustmann, A. Bito, SECONDARY BATTERIES – HIGH TEMPERATURE SYSTEMS | Safety, Editor(s): Jürgen Garche, *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Elsevier, 2009, Pages 324-333, <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00391-9>.

-
- [67] Curto, D.; Franzitta, V.;Guercio, A. A Review of the WaterDesalination Technologies.Appl. Sci.2021,11, 670. <https://doi.org/10.3390/app11020670>
 - [68] Postupak destilacije, dostupno na: <http://energy-without-carbon.org/Desalination>
 - [69] PSI Filters. Osmosis and reverse osmosis 2017.
 - [70] Warsinger, David & Mistry, Karan & Nayar, Kishor & Chung, Hyung Won & V, John. (2015). Entropy Generation of Desalination Powered by Variable Temperature Waste Heat. Entropy. 17. 7530-7566. 10.3390/e17117530.
 - [71] Sustav povratne osmoze, dostupno na: <https://www.sana-store.fr/marlus-650-reverse-osmosis-system>
 - [72] K. Oikonomou and M. Parvania, "Optimal Participation of Water Desalination Plants in Electricity Demand Response and Regulation Markets," in *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 3729-3739, Sept. 2020, doi: 10.1109/JSYST.2019.2943451.
 - [73] Antonyan M.; Energy Footprint of Water Desalination, dostupno na: <https://essay.utwente.nl/78100/1/Antonyan%2C%20M.%201817078%20openbaar.pdf>