

# 1. NEKI PUTEVI KA ENERGETSKOJ ODRŽIVOSTI

*Vladimir Komnenić, Slobodan Jovanović\**

**Sažetak:** Brzi ekonomski rast u budućnosti, povezan sa uvećanjem energetske potreba i, posljedično, povećanjem potrošnje fosilnih goriva, prijeti da uspostavi neodrživi energetski sistem, zasnovan na neobnovljivim, visokozagađujućim (posebno CO<sub>2</sub>) izvorima. Rješenje problema (obezbjeđenje obilne, sigurne, čiste i prihvatljive energije za potrebe budućnosti) je u domenu političkih odluka, spremnosti za visoke investicije itd., ali se kao usko grlo posebno pojavljuje nedostatak novih, efikasnih tehnologija. U ovom prilogu su kratko obrađene neke unaprijedene, postojeće i nove tehnologije: CCS, nuklearna, biogoriva, vodonična, EES, kao i pozicija Crne Gore u svijetlu sadašnjeg stanja i budućih mogućnosti.

**Ključne riječi:** *CCS, nuklearna energija, biogoriva, vodonik, EES*

**Abstract:** Fast global economic growth in the future, coupled with rising energy demand and, consequently, increasing fossil fuel consumption, threatens to create an unsustainable energy system, based on nonrenewable, highly polluting (particularly CO<sub>2</sub>) sources. The solution to the problem (providing abundant, secure, clean and affordable energy for future needs) lies in the field of political decisions, readiness for enormous investments etc., but the lack of new, efficient technologies appears to be the bottle-neck. Some improved, existing and new technologies as: CCS, nuclear, biofuels, hydrogen, EES as well as the position of Montenegro in the light of current state and future opportunities were, briefly, discussed in this paper.

**Key words:** *CCS, nuclear, biofuels, hydrogen, EES*

## 1. 1. UVOD

Brzi ekonomski razvoj, koji posebno karakteriše posljednje decenije, zasnovan je na novim znanjima i tehnologijama, ali i na ubrzanoj eksploataciji neobnovljivih i sporoobnavljajućih prirodnih resursa. Očigledno i dramatično narušavanje suptilnih

---

\* Prof. dr Vladimir Komnenić, Metalurško-tehnološki fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica

\*\* Prof. dr Slobodan Jovanović, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica

prirodnih ravnoteža pokazuje da bi ovaj koncept, iako trenutno atraktivan, mogao biti poguban i po čovječanstvo i po njegovo okruženje. Nekontrolisani rast populacije na planeti, težnja društava i pojedinaca za višim životnim standardom, neumjerena potrošnja podstaknuta neutaživom pohleptom kompanija, u različitim sektorima, za enormnim profitom, kao i prepuštanja „deus ex machina” rješenjima, ozbiljno ugrožavaju sadašnje, a naročito buduće generacije i njihovo pravo na dostojanstveni život. Kao moguća alternativa ekonomskom, danas se sve više promovira koncept održivog razvoja, koji bi omogućio zadovoljenje potreba sadašnjih, bez ugrožavanja prava na ispunjenje potreba generacija koje dolaze. Ovaj koncept obuhvata brigu o kapacitetu prirodnih resursa, zajedno sa ekonomskim, socijalnim i kulturnim izazovima, sa kojima se čovječanstvo suočava. Prelazak sa jedne na drugu strategiju nije na kraju, nije ni na početku kraja, već prije na kraju početka (Čerčil, drugim povodom). Brzina tranzicije je, uz to, uveliko ometena postojećim navikama i zavisnostima, nespremnosti velikih zemalja za radikalne promjene, djelovanjem moćnih sirovinskih i energetskih lobija, ali i nedovoljnim znanjima i nedostatkom efikasnih tehnologija.

Fenomen globalnog otopljanja, povezan sa brzim ekonomskim rastom, a izazvan antropogenom emisijom gasova staklene bašte, postaje glavna prijetnja razvoju, stabilnosti i budućnosti čovječanstva. Brojni scenariji, koji se bave klimatskim promjenama, njihovim uzrocima i posljedicama, predviđaju u budućnosti različite ishode. Stanje u kojemu ćemo se naći zavisi od stepena spremnosti svih društava za koordiniranu akciju, visoke investicije, neophodne naučnotehnološke proboje i, uopšte, prihvatanje koncepta održivog razvoja kao, vjerovatno, jedine i spasonosne alternative.

U narednom tekstu fokus će biti usmjeren na mogućnosti nekih novih tehnologija za prevenciju klimatskih promjena i ostvarenje koncepta čiste, sigurne i dovoljne energije, prvenstveno u energetskom i transportnom sektoru.

## 1. 2. UTICAJ ENERGETIKE NA KLIMATSKE PROMJENE I PERSPEKTIVE

Očekivani rast globalne ekonomije do 2050. godine, u odnosu na današnje stanje, iznosi četiri, dok se u brzorazvijajućim zemljama (Kina, Indija...) procjenjuje na čak deset puta. Kao bazična podrška ekonomskom rastu i razvoju biće udvostručen i rast globalnih energetskih potreba.

Već danas je očigledan neodrživi pritisak na neobnovljive prirodne resurse i životnu sredinu, koji će se uvećavati u budućnosti, ukoliko ekonomski rast ne bude značajnije odvojen od energetske raspoloživosti, a potrebe za fosilnim gorivima bitno redukovane.

Prema BUSINESS AS USUAL scenariju, potrebe za fosilnim gorivima (posebno naftom i prirodnim gasom) će do 2050. godine znatno narasti, uz brzo povećanje emisije gasova staklene bašte (posebno CO<sub>2</sub>), podrazumijevajući da, u međuvremenu, neće doći do radikalnijih promjena u energetskoj politici, kao ni do novih, bitnih naučnotehnoloških proboja. Zavisnost od nafte će, dakle, i dalje biti visoka, a zemlje proizvođači i naftne kompanije će nastojati da održe status quo, tvrdeći, kao i do sada, da su na pragu otkrića novih, izdašnih nalazišta, zamagljujući pri tom svijest

o opasnosti dostizanja „naftnog vrha” (brža potrošnja od pronalaska novih rezervi). Politikom cijena će, pak, nastaviti da obeshrabruju razvoj novih alternativnih goriva i tehnologija. Energetska potrošnja po jedinici globalnog BDP-a će, nakon kratkog pada, nastaviti da raste, a uticaj environmentalista će se ograničiti na legislativu i međunarodne sporazume. Električna energija će se, najvećim dijelom, proizvoditi iz uglja, dok će korišćenje nuklearne energije nastaviti da prate nedoumice oko bezbjednosti rada, odlaganja otpada i opasnosti od proliferacije goriva. Biogoriva će se i dalje, većinom, dobijati iz žitarica, produbljujući konflikt sa rastućim potrebama za hranom. Izuzimajući hidropotencijal i, donekle, biomasu, ostali obnovljivi izvori će biti marginalno zastupljeni.

U ovom dijelu potprojekta *Energija*, akcenat je stavljen na efekte antropogene emisije CO<sub>2</sub> iz fosilnih goriva, od kojih najveću opasnost predstavlja globalno otopljanje, kao i na neke nove tehnologije koje bi omogućile djelimično ili potpuno rješenje problema.

Sve države, koje pokazuju ozbiljnu zabrinutost oko energetske i klimatske budućnosti, a raspolazu značajnijim ekonomskim i naučnotehnološkim potencijalom, uočavaju tri osnovna izazova:

- energetske nezavisnost;
- očuvanje životne sredine;
- ekonomsku održivost u energetskej sektoru.

Ovi izazovi su toliko veliki da današnji energetskej sistem, čak i uz poboljšanja u tehnološkej smislu, ali na evolutivan način, neće biti dovoljan da obezbijedi sigurnu energetskej budućnost i očuvanje globalne prirodne ravnoteže. Sasvim je izvjesno da će se morati implementirati nove tehnologije, bazirane na novim naučnim saznanjima (posebno na polju fizike, hemije, biologije, nauke o materijalima, nano nauka i kompjuterskih nauka) u oblasti proizvodnje, skladištenja i krajnje upotrebe energije, sa performansama daleko iznad danas raspoloživih.

Kako je sadašnji energetskej sistem neodrživ (osiromašenje neobnovljivih resursa, koncentracija naftnih i gasnih nalazišta u malom broju zemalja, porast cijena fosilnih goriva, niska efikasnost, posljedice emisije CO<sub>2</sub>...), u razvijenim zemljama, koje će i ponijeti glavni teret osvajanja i primjene novih tehnologija, postavljaju se tri strateška cilja:

- proizvodnja goriva uz pomoć solarne energije;
- proizvodnja električne energije bez emisije CO<sub>2</sub>;
- bitno povećanje energetske efikasnosti.

Proizvodnja goriva iz sunčeve svjetlosti, CO<sub>2</sub> i vode učinila bi nepotrebnim njihovo vađenje iz zemlje. Električna energija bi se proizvodila solarnim putem, pomoću vjetrogeneratora, iz čistog uglja (uz sekvencijalnu) i u unaprijeđenim nuklearnim elektranama. Vozila bi pokretali efikasni električni motori uz pomoć novih generacija baterija i gorivnih ćelija.

Za ostvarenje pomenutih ciljeva potrebni su, umjesto današnjeg koncepta „korak po korak”, novi, revolucionarni proboji u nauci i tehnologiji, koji bi omogućili: porast efikasnosti konverzije solarne u električnu energiju za 2–3 puta, kapaciteta baterija i superkondenzatora za red veličine, rad elektrana na ugallj i nuklearnih generatora na znatno višim temperaturama od današnjih (porast efikasnosti), osvajanje novih

materijala dizajniranih po principu „atom po atom” i nano struktura u kojima svaki atom ima specifičnu funkciju. Kreiranje ovakvih materijala, kao i detaljna kontrola hemijskih procesa i uopšte interakcija između fotona, elektrona i hemijskih veza, zahtijevaće karakterizacije struktura i praćenje dinamike procesa na daleko višem nivou od sadašnjeg.

Godišnja emisija CO<sub>2</sub>, koja je dominantno antropogenog porijekla i čak iznad 80% uzrokovana korišćenjem fosilnih goriva (ugalj, nafta, gas), iznosi oko 29 Gt. Rast sadržaja CO<sub>2</sub> u atmosferi, u kojoj se zadržava oko 58% emitovane količine, ubrzava se i njegova današnja koncentracija doseže 385 ppm. To je značajan porast u odnosu na predindustrijsko doba (280 ppm). CO<sub>2</sub> je tzv. globalni zagađivač zbog sposobnosti da se veoma brzo rasprostire kroz ukupnu atmosferu.

Pored CO<sub>2</sub>, u grupi gasova staklene bašte (GSB), odgovornih za rast prosječne temperature na zemlji, zbog sprečavanja refleksije IC zračenja sa površine, nalaze se i drugi, prirodni ili sintetički gasovi: CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC, HCFC, SF<sub>6</sub>, PFC, vodena para itd. Ipak, zbog ekstremno visoke emisije i povezanosti sa proizvodnjom električne energije, transportom i industrijom, kao glavni cilj se postavlja redukcija generacije CO<sub>2</sub>, kroz dekarbonizaciju goriva i procesa.

U cilju stvaranja strategije redukcije emisije CO<sub>2</sub> kao i obezbjeđenja sigurne i dovoljne energije i sagledavanja posljedica nečinjenja ili brze primjene radikalnih mjera, razrađeni su brojni scenariji energetske budućnosti i klimatskih promjena, sa različitim vremenskim dometima.

U izvještaju IEA za 2008. godinu (Energy, technology, perspectives) razmatraju se tri osnovna scenarija sa podvarijantama, do 2050. godine.

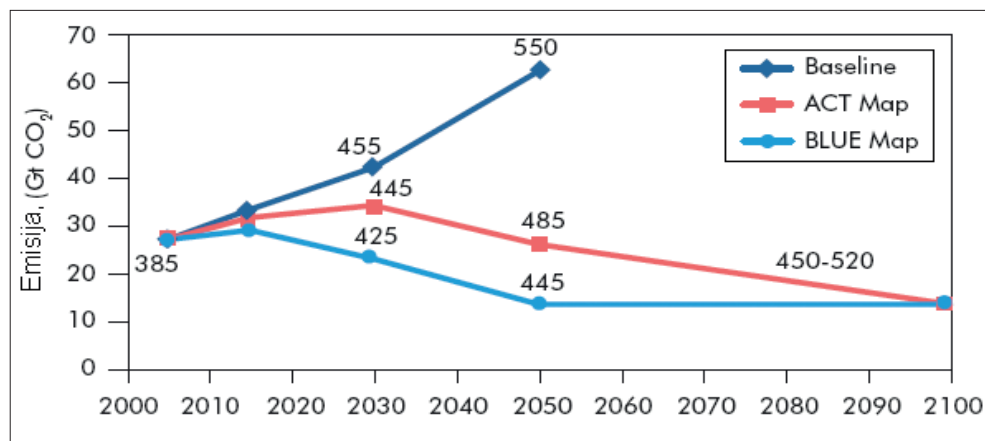
Prema BASELINE (Business as usual) scenariju, kojim se ne predviđaju velike promjene niti u energetske politici niti na naučnotehnološkom planu, bilježice se, do 2050. godine, stabilni rast globalne emisije CO<sub>2</sub> (130%) i potreba za naftom (70%). Prosječna temperatura na zemlji će porasti za 6°C i stabilizovati se na tome ili nešto višem nivou. Kao posljedica će se javiti bitni poremećaji u svim aspektima života, kao i nepovratna oštećenja u prirodnom okruženju. Za predupređenje ovakvog raspleta potrebna je, pored mjera za adaptaciju na izmijenjene okolnosti, i globalna revolucija u oblasti proizvodnje, skladištenja i krajnje upotrebe energije, koja podrazumijeva znatno veću energetske efikasnost, masovnije korišćenje obnovljivih izvora, upotrebu nuklearne energije, izdvajanje i skladištenje CO<sub>2</sub> i dekarbonizaciju goriva za transport. Neophodna je, takođe, i suštinska promjena politike vlada, kao i bitno unaprijeđena saradnja vodećih ekonomija.

ACT scenario predviđa korišćenje postojećih, naprednih tehnologija, ali i onih koje su u ozbiljnom razvoju. Primjenom ovih mjera, uz predviđena ulaganja od 50 USD po toni smanjene emisije CO<sub>2</sub>, nivo generacije bi bio vraćen na današnji do 2050, uz maksimum između 2020. i 2030. godine.

BLUE scenario postavlja za cilj redukciju globalne emisije CO<sub>2</sub> od 50% u odnosu na današnji nivo, što predstavlja ogroman izazov. Cijena po toni smanjene emisije CO<sub>2</sub> u ovom slučaju, raste na 200 USD, ali samo u optimističkoj varijanti sa brzim napretkom novih tehnologija.

U oba scenarija (ACT i BLUE), prvi cilj je povećanje energetske efikasnosti u zgradama, uređajima, transportu, industriji i proizvodnji električne energije, što je ostvarivo uz relativno mala ulaganja i za kraće vrijeme. Po značaju, sljedeći cilj je dekarbonizacija proizvodnje električne energije kroz masovnu upotrebu obnovljivih izvora, nuklearnu energiju i izdvajanje i odlaganje CO<sub>2</sub> iz gasnih i elektrana na uglj. BLUE scenario dodatno uključuje i sekvencijalnu CO<sub>2</sub> u industriji i alternativna goriva u transportu.

Godišnja emisija CO<sub>2</sub> povezanog sa energijom, prema tri scenarija, data je na Slici 1. Prema Baseline scenariju emisija će porasti sa sadašnjih 29 Gt na 62 Gt u 2050. godini, dok će koncentracija CO<sub>2</sub> dostići 550 ppm (sada 385 ppm). ACT predviđa sadašnji nivo emisije i 2050. godine, uz koncentraciju CO<sub>2</sub> od 485 ppm, sa stabilizacijom na 520 ppm. Redukcija emisije od 50%, u odnosu na današnju (BLUE scenario), zadržala bi koncentraciju CO<sub>2</sub> na 450 ppm do 2050. godine i bitno snizila rast prosječne temperature na samo 2°C, u odnosu na predindustrijsko doba. Između 2050. i 2100. godine energetski sektor bi bio dekarbonizovan i prema ACT i po BLUE scenariju.



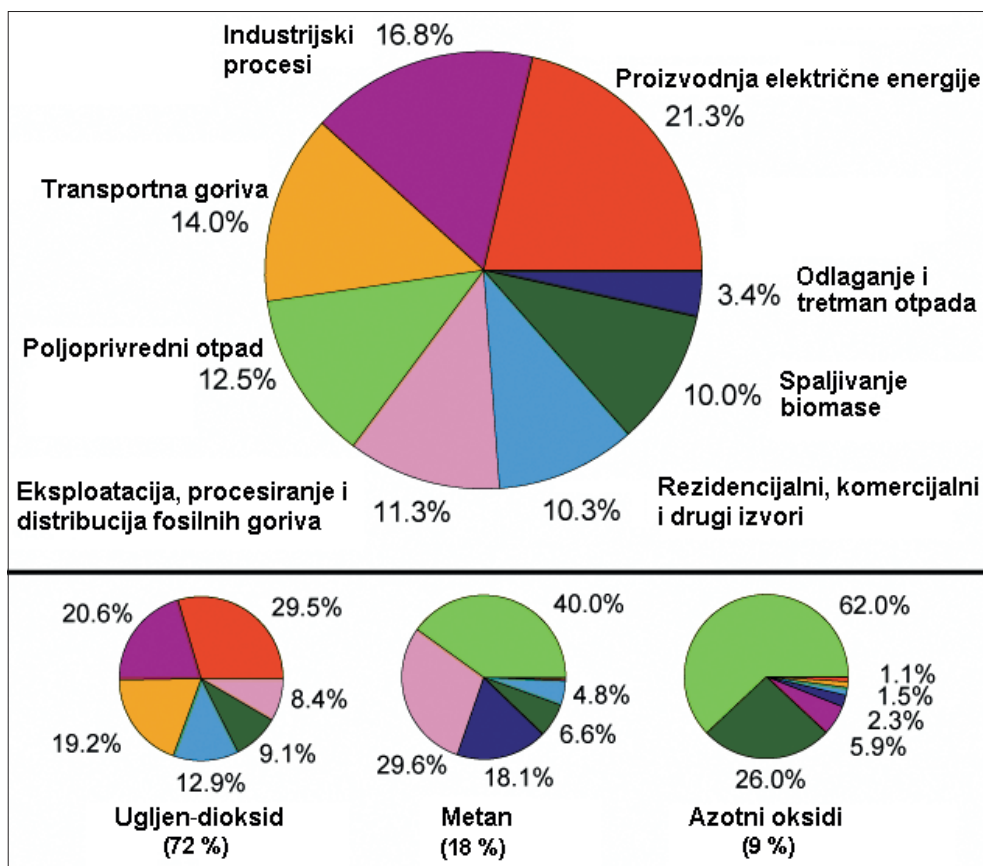
Slika 1. 1. Emisija energetski povezanog CO<sub>2</sub> i koncentracijski profil za Baseline, ACT i Blue scenario (IEA, Energy, technologies, perspectives, 2008)

Iako je redukcija emisije CO<sub>2</sub> dominantna tema, podrazumijevaju se i mjere za smanjenje emisije ostalih gasova staklene bašte, posebno metana. Glavni uzroci antropogene emisije GSB su:

- energetske transformacije (primarni izvori – fosilna goriva i biomasa);
- deforestacija;
- industrijski procesi (proizvodnja cementa...);
- poljoprivreda (uključujući fertilizaciju);
- otpad.

Udio pojedinih sektora u emisiji GSB, odnosno CO<sub>2</sub> prikazan je na Slici 1. 2.

Utjecaj pojedinih gasova iz ove grupe zavisi od njihove prirode (radijativno dejstvo), sadržaja i vremena boravka u atmosferi. Tzv. Global Warming Potential metana je 22 puta veći nego za CO<sub>2</sub>.



Slika 1. 2. Godišnja emisija GSB po sektorima

Posljedice rasta prosječne temperature, koji je izazvan emisijom GSB, su brojne, uz direktno ugrožavanje razvoja, pa čak i opstanka života na planeti:

- topljenje leda u polarnim područjima;
- podizanje nivoa svjetskog mora;
- prodiranje morske u rezervoare slatkih pijaćih voda;
- suše – poplave;
- rast intenziteta i učestalosti uragana;
- ugrožena proizvodnja hrane;
- pojava novih bolesti (novi virusi i bakterije);
- migracije stanovništva;
- socijalni nemiri;
- sukobi oko životnog prostora itd.

U eri globalnog otopljanja moguća su i regionalna zahlađenja, iako je uzrok zajednički. Npr. miješanjem tople Golske struje sa hladnim vodama, nastalim otapanjem leda na Grenlandu, došlo bi do sniženja temperature duž evropskih obala.



Svjesne ozbiljnosti globalne prijetnje, kao i sopstvene odgovornosti, zemlje potpisnice Kjoto protokola su se obavezale da će redukovati emisiju GSB za 5,2% (izraženo preko ekvivalentnog  $\text{CO}_2$ ) do 2012, a u odnosu na 1990. godinu. Međutim, upravo posljednjih godina uočen je brzi rast emisije, posebno  $\text{CO}_2$ , što ozbiljno dovodi u pitanje ostvarenje postavljenih ciljeva. Očigledno je da sama politička volja, uz nedostatak novih efikasnih tehnologija, a u vremenu rastućih energetske potreba, nije dovoljna za rješavanje problema. Već je u pripremi novi samit, na kome bi trebalo da se donesu važne odluke za postkjoto period.

Evropa je, takođe, objavila svoj plan do 2020. godine, kojim se predviđa dostizanje zastupljenosti obnovljivih izvora u proizvodnji električne energije i upotrebe biogoriva u transportu od 20%, kao i povećanje energetske efikasnosti za isti procenat.

Antropogena emisija gasova sa štetnim posljedicama na ukupni ekosistem ne ograničava se samo na slučaj GSB, niti samo na globalno otopljanje kao posljedicu. Uočavaju se još najmanje dva globalna fenomena: kisjele kiše i problemi sa ozonskim omotačem.

Kisjele kiše su direktna posljedica antropogene emisije, prvenstveno (90%) azotnih i sumpornih jedinjenja. Uglavnom se radi o oksidima ( $\text{N}_x\text{O}$ ,  $\text{SO}_2$ ) koji, sa vlagom u atmosferi, stvaraju kisjeline. Kategoriji kisjelih kiša pripadaju one sa pH vrijednošću ispod prirodne granice od 5,2. Fenomen, baš kao i u slučaju emisije  $\text{CO}_2$ , nije lokalizovan na uže područje, već pokazuje globalni karakter. Izvori emisije ovih gasova su dominantno:

- sagorijevanje uglja;
- industrijski procesi;
- transport,

zbog čega se ovaj fenomen prvenstveno vezuje za energetske transformacije. Posljedice su brojne i veoma štetne:

- nelokalizovana zagađenja;
- ugrožavanje prirodne kopnene vegetacije i usjeva;
- ugrožavanje akvatičkog života;
- uticaj na ljudsko zdravlje.

Problem je moguće riješiti primjenom preventivnih mjera, prvenstveno korišćenjem hemijskih skrubera, katalitičkih konvertora, prečišćavanjem uglja, poboljšanjem kvaliteta motornih goriva i rada motora sa unutrašnjim sagorijevanjem.

Sljedeći globalni fenomen, izazvan antropogenom emisijom specifičnih gasova, je ubrzano siromašenje ozonskog zaštitnog omotača, odnosno njegovo regionalno probijanje. Naime, konstatuje se sporo, stabilno smanjenje debljine stratosferskog ozonskog sloja iznad područja na nižim geografskim širinama, kao i njegovo brzo, sezonsko probijanje iznad polarnih oblasti, posebno Antarktika. Uzroci su isključivo antropogenog porijekla i nalaze se u prekomjernoj upotrebi freona (CFC) i halona (BFC) u rashladnim uređajima i sprejevima. Posljedice emisije su:

- porast UV zračenja na površini zemlje;
- uništavanje bakterija potrebnih za rast biljaka i planktona;
- porast sadržaja troposferskog ozona, djelovanjem UV zraka na gasovite produkte sagorijevanja motornih goriva;
- učestala pojava različitih vrsta kancera kod ljudi.

Montrealskim protokolom (1995) zabranjuje se korišćenje freona i halona.

### 1. 3. IZDVAJANJE I SKLADIŠTENJE CO<sub>2</sub>

Potreba za redukcijom emisije CO<sub>2</sub>, koji kao gas staklene bašte pokazuje dominantni efekat na fenomen globalnog otopljanja, nalazi se u fokusu ukupne svjetske političke, naučne i laičke javnosti. Nesumnjivo dokazana veza između rasta sadržaja CO<sub>2</sub> u atmosferi i povišenja prosječne temperature na zemlji nameće potrebu iznalaženja brzog i efikasnog rješenja, kojim bi se omogućilo ostvarenje koncepta čiste, ali i sigurne i dovoljne energije. Prethodno navedeni scenariji (i brojni drugi) ukazuju na moguće puteve ka ostvarenju cilja, kao i na brzinu implementacije potrebnih tehnologija, a u zavisnosti od tempa osvajanja novih naučnih i tehnoloških znanja i spremnosti za visoka ulaganja.

Izvori emisije CO<sub>2</sub> su brojni i različiti, ali se po značaju, ipak, izdvajaju tri oblasti: proizvodnja električne energije, industrija i transport. Od ukupne emisije 41% otpada na energetski sektor. Oba optimistička scenarija (ACT i BLUE) obuhvatili su mjere neophodne upravo u ovome sektoru, dok se oblašću industrije i transporta bavi samo drugi.

Povećanje udjela nuklearne u proizvodnji električne energije, kao i rast zastupljenosti obnovljivih izvora, predstavlja moguće rješenje. Danas se, međutim, električna energija, najvećim dijelom proizvodi u termoelektranama iz fosilnih goriva, najčešće iz uglja. Broj ovakvih postrojenja je u stalnom porastu, posebno u brzorazvijajućim zemljama (Kina, Indija...). Nedostatak drugih izvora, kao i veliki i širokorasprostranjeni resursi uglja, definišu energetske orijentacije. Pored toga, brzi i konstantni rast cijena nafte i gasa okreće ekonomije ka povećanom oslanjanju na jeftiniji ugalj. U okolnostima masovnog korišćenja ove vrste goriva, posebno u energetskom sektoru, moguće parcijalno rješenje predstavlja gasifikacija, uz korišćenje kombinovanog ciklusa (parna i gasna turbina), kojom se unapređuje efikasnost i umanjuju štetne posljedice (smanjena emisija SO<sub>2</sub>, Hg i čestica). Treba napomenuti da se postupak gasifikacije uglja ne predviđa u daljoj budućnosti. Uvođenje elektrana sa poboljšanom efikasnošću podrazumijeva gašenje velikog broja postrojenja sa starim tehnologijama. Ekonomska strana energetskog sektora je, međutim, za brojne zemlje važnija od prevencije posljedica. No, bez obzira na to da li se koristi prečišćeni ili gasifikovani ugalj, osnovni problem – emisija CO<sub>2</sub> – i dalje ostaje.

Suočeni sa enormnom emisijom CO<sub>2</sub>, ali i sa neminovnošću daljeg korišćenja termoelektrana na ugalj, kao jedino praktično rješenje nameće se njegovo izdvajanje iz smješe otpadnih gasova i, naknadno, bezbjedno skladištenje, čime bi se spriječila emisija u atmosferu. Ovi postupci se nalaze u fazi ozbiljnog razmatranja i razrade, ali je njihova implementacija još ograničena na mali broj postrojenja i lokacija. Primjena ove tehnologije je daleko ekonomičnija u slučaju ograničenog broja velikih emitera, nego za veći broj malih emisionih centara. Ovo i jeste razlog zbog kojega se pomenuti postupak, u energetskom sektoru, razmatra i u ACT i u BLUE scenariju, dok se industrijom i transportom (veliki broj manjih zagađivača) bavi samo posljednji.

Izgradnja novih elektrana na ugalj (i prirodni gas), sa ugrađenim sistemima za izdvajanje CO<sub>2</sub>, zahtijevaće i njihovo lociranje na mjestima povezanim sa pozicijama za skladištenje. Troškovi za ukupni lanac (izdvajanje, transport i skladištenje) su u porastu od 2005, usljed poskupljenja materijala i pripreme i obezbjeđenja skladišnih



prostora. Ulaganja od oko 50 USD po toni smanjene emisije CO<sub>2</sub> omogućila bi masovnu primjenu postupka i posljedično obaranje nivoa emisije, čak do nultih vrijednosti, uz dalju upotrebu fosilnih goriva. Prema BLUE scenariju, primjena postupka izdvajanja i odlaganja CO<sub>2</sub> u energetske sektoru, dovela bi do redukcije emisije od 20%.

Izdvajanje CO<sub>2</sub> iz smješe gasova nastalih sagorijevanjem fosilnih goriva (uglavnom CO<sub>2</sub>, azotni oksidi i vodena para) podrazumijeva njeno procesiranje i naknadno komprimovanje. Transport se obavlja kopnenim ili podvodnim cjevovodima, brodovima ili kamionima. CO<sub>2</sub> se, na large-scale nivou, skladišti u pogodnim geološkim formacijama. Izdvajanje gasa iz smješe nastale pri proizvodnji električne energije ili u industriji obavlja se poslije ili prije sagorijevanja kao i tzv. oxy-fuel postupkom. U prvom slučaju, CO<sub>2</sub> se odvaja od azotnih oksida i vodene pare (2–25% CO<sub>2</sub>) na nižim pritiscima, pri čemu je ekonomičnost procesa glavni problem. Postupak prije sagorijevanja se primjenjuje nakon gasifikacije uglja (ili parne reformacije prirodnog gasa), pri čemu cilj može biti i proizvodnja vodonika, upotrebom viška vodene pare. Oxy-fuel postupak podrazumijeva sagorijevanje goriva u recikliranoj struji gasa, obogaćenoj kiseonikom, zbog čega izlazna smješa ima znatno uvećani sadržaj CO<sub>2</sub>. Izdvajanje iz otpadnih gasova najčešće se izvodi apsorpcijom pomoću aaminskih solvenata. Apsorbirani CO<sub>2</sub> se naknadno desorbuje povišenjem temperature i dobija u čistoj formi. Alternativni postupci su membranske separacije i adsorpcija na čvrstim fazama. Sagorijevanje fosilnih goriva u struji čistog kiseonika (umjesto vazduha) pojednostavljuje i pojeftinjuje samo izdvajanje iz gasne smješe, jer je, u tom slučaju, CO<sub>2</sub> potrebno odvojiti samo od vodene pare, jednostavnim i jeftinim postupkom njene kondenzacije. U svakom slučaju, od ukupnih troškova postupka izdvajanja, transporta i skladištenja 40–80% otpada na samu separaciju. Primjena ove tehnologije se prvenstveno vezuje za postrojenja sa visokoefikasnom proizvodnjom električne energije i ne razmatra se za slučaj konvencionalnih termoelektrana, koje su danas dominantno zastupljene.

U oblasti transporta komprimovanog CO<sub>2</sub> cjevovodi su najefikasnije rješenje, pogotovo za udaljenosti veće od 1.000 km. Cijena iznosi 1–8 USD/tCO<sub>2</sub> na kopnu i uvećava se 40–80% za slučaj podvodnog transporta.

Skladištenje CO<sub>2</sub>, na large-scale nivou, u geološkim formacijama je danas jedino praktično i prihvatljivo rješenje. Ispražnjene naftne ili gasne formacije kao i podzemni rezervoari zaslanjenih voda (prvenstveno) su najbolje lokacije, mada treba napomenuti da njihova sigurnost kroz duže vrijeme nije još dovoljno ispitana i poznata. Određena iskustva ipak postoje. Već duže od 30 godina primjenjuju se tzv. EOR postupci, pri čemu se u naftne rezervoare, čiji je vijek pri kraju, ubrizgava CO<sub>2</sub> koji poboljšava eksploatacionu efikasnost, a sam, potiskujući naftu, ostaje unutar formacije. U primjeni je i postupak uvođenja CO<sub>2</sub> u podzemne naslage uglja, čime se olakšava izdvajanje metana.

Bazalti, kaverne i napušteni podzemni rudnici takođe mogu biti iskorišćeni za odlaganje, ali je primjena ograničena zbog raspoloživih prostora, nedostatka prirodne zaptivenosti i mogućih hemijskih interakcija. Odlaganje CO<sub>2</sub> na dno okeana, gdje bi usljed visokih pritisaka i niskih temperatura bio deponovan kao čvrsta faza, predstavlja jednu od mogućnosti, ali zbog nepoznavanja uticaja različitih poremećaja, ovaj postupak ima i najviše protivnika. Skladištenje u okeanu, upumpavanjem i rastvaranjem, prijeto povećanom acidifikacijom voda, uz moguće štetne posljedice po akvatički svijet.

Izdvajanje i skladištenje CO<sub>2</sub> se, dakle, prvenstveno razmatra za slučaj elektrana na fosilna goriva, pri čemu se njegova separacija obavlja iz smješe otpadnih gasova, a zatim se odlaže u geološke formacije. Svakako, sveobuhvatniji i globalno značajniji bio bi postupak izdvajanja CO<sub>2</sub> iz vazduha, uz naknadnu sekvestraciju, što bi efektiviralo sniženjem njegovog sadržaja u atmosferi. Umjesto CO<sub>2</sub>, takođe, bilo bi mnogo racionalnije skladištiti sam ugljenik, imajući u vidu odnose molskih masa (44 prema 12) i zapremina ili, pak, čvrsta ugljenična jedinjenja. Takođe, trajnim sekvestriranjem kiseonika uz ugljenik, remeti se prirodni kiseonični ciklus. Šume ili, uopšte, biomasa, okeani i zemljište predstavljaju ogromne raspoložive rezervoare za odlaganje, bilo u formi gasa ili u nekom čvrstom obliku. Cilj je, bez obzira na to koji se postupak koristi, spriječiti odlazak (ili povratak) CO<sub>2</sub> u atmosferu. Stoga se predlažu i razmatraju i brojna druga rješenja, više ili manje prihvatljiva i primjenljiva, i svrstavaju u tri grupe postupaka: fizički, hemijski i biološki.

### 1. 3. 1. FIZIČKI POSTUPCI

*Odlaganje bioćumura.* Dobija se pirolizom biomase i odlaže na deponije ili se koristi kao dodatak tlu. Njegovim zakopavanjem se onemogućava oksidacija ugljenika do CO<sub>2</sub> i povratak u atmosferu.

*Biomasa uz izdvajanje i skladištenje.* CO<sub>2</sub> se izdvaja i skladišti tokom korišćenja biomase za proizvodnju električne energije ili u industriji. Rezultat je negativna neto emisija, jer se ugljenik dva puta sekvestrira – kroz rast biomase (fotosinteza) i nakon njenog sagorijevanja.

*Zakopavanje biomase.* Primjenjuje se na otpadnu i manje korisnu biomasu uz sprečavanje oksidacije ugljenika i povratak CO<sub>2</sub> u atmosferu. Ovaj postupak oponaša prirodni proces nastajanja fosilnih goriva.

*Odlaganje biomase u okeane.* Primjenljivo na otpad od usjeva koji se odlaže i skladišti u okeanima, uz znatnu sekvestraciju ugljenika.

### 1. 3. 2. HEMIJSKI POSTUPCI

*Mineralna sekvestracija.* Ugljenik, u formi CO<sub>2</sub>, može se ukloniti iz atmosfere hemijskim procesima, a zatim skladištiti u stabilnom obliku. CO<sub>2</sub> iz vazduha spontano reaguje sa metalnim oksidima ili, češće, silikatima na površini zemlje, stvarajući čvrste karbonate kroz koje je ugljenik definitivno sekvestriran. Proces se može znatno ubrzati povišenjem temperature i pritiska.

*Okeansko skladištenje u bazaltima.* Sekvestracija podrazumijeva upumpavanje CO<sub>2</sub> u duboke okeanske slojeve. Nakon miješanja sa slanom vodom hemijski reaguje sa bazaltima na dnu, stvarajući stabilne karbonate kalcijuma i magnezijuma.

*Skladištenje u industrijskim proizvodima.* Poznato je da je industrija cementa značajan emiter CO<sub>2</sub> (do 5% ukupne emisije). Radi se na osvajanju novih vrsta cementa koje, pri očvršćavanju, vezuju uvećane količine ovoga gasa iz vazduha. Treba napomenuti da se velike količine CO<sub>2</sub> koriste za industrijsku karbonizaciju pića, pri proizvodnji hrane, u naftnoj industriji, pri zavarivanju, u rashladnim sistemima i za punjenje protivpožarnih aparata, čime se, opet, redukuje njegova emisija u atmosferu.

*Hemijski skruberi.* CO<sub>2</sub> se uklanja iz vazduha koristeći različite varijante Kraftovog procesa.

*Neutralizacija okeanskih kisjelina.* Dodatkom u okeane smrvljenog krečnjaka ili vulkanskog stijena, značajno se uvećava apsorpcija CO<sub>2</sub> iz atmosfere, bez opasnosti od dodatne acidifikacije voda.

### 1. 3. 3. BIOLOŠKI POSTUPCI

*Okeanska fertilizacija željezom.* Unošenjem željeza u okeane značajno se ubrzava rast planktona, koji je praćen utroškom CO<sub>2</sub> kroz proces fotosinteze. Uticaj željeza na morski sistem je, međutim, teško predvidljiv.

*Okeanska fertilizacija ureom.* Unošenjem viška azota preko uree u okeane, takođe se ubrzava rast planktona i sekvstriraju velike količine ugljenika.

*Forestacija.* Prirodni proces vezivanja ugljenika kroz fotosintezu. Potrebno je spriječiti povratak u atmosferu tokom spaljivanja i truljenja.

*Poljoprivreda.* Zemljište sadrži ogromne količine organskog ugljenika, veće od ukupnog sadržaja u atmosferi i vegetaciji. Modifikacijom postupaka u poljoprivredi moguće je dodatno uvećati kapacitet tla za odlaganje.

*Okeansko miješanje.* Postavljanjem dugih vertikalnih cijevi u okeane, voda bogata hranljivim sastojcima iz donjih slojeva prodire ka površini, ubrzavajući rast algi, koje vezuju ugljenik i nakon uginuća.

*Odlaganje u tresetišta.* Stvaranjem novih i proširenjem postojećih tresetišta uvećava se kapacitet za odlaganje ugljenika.

Vraćajući se na izdvajanje CO<sub>2</sub> iz smjese otpadnih gasova nakon sagorijevanja uglja (i prirodnog gasa) u termoelektranama, a zatim njegovo odlaganje u geološke formacije, što danas i jeste prvenstveni cilj pri saniranju posljedica rada energetskog sektora, i dalje se susrećemo sa problemima. Separacione tehnike i materijali (membrane, čvrsti i tečni apsorbeni) moraju biti unaprijeđeni, što bi omogućilo znatno veću ekonomičnost postupka, a mogući fizički i hemijski procesi u formacijama poznati i proučeni. Gledajući na duže staze, čak se postavlja i pitanje kapaciteta formacija za skladištenje CO<sub>2</sub> ukoliko emisija bude u stalnom porastu. Predviđa se da će do 2100. godine biti potrebno sekvstrirati oko 1 bilion tona, tako da će se morati tražiti i alternativna rješenja.

## 1. 4. NUKLEARNA ENERGIJA

Dobijanje električne energije iz nuklearnih elektrana (NE) je uhodana tehnologija sa preko pedeset godina prakse i iskustva. Nuklearni reaktori kao izvori energije koncipirani su tokom II svjetskog rata, radi proizvodnje nuklearnog oružja (projekt „Manhattan”, SAD). Ubrzo su modifikovani za pogon plovni objekata (podmornica i ledolomaca), što je u osnovi princip koji je iskorišten kod NE. Prva NE priključena je na mrežu u Sovjetskom Savezu 1954. godine (NE Obninsk kod Moskve, 5 MW). Trenutno je (oktobar 2009) u pogonu 436 reaktora u 30 zemalja, instalisane (električne) snage 373.000 MW. Do sada je akumulirano oko 14.000 reaktor-godina rada NE.

U 2008. godini NE su proizvele 2.6 milijardi MWh električne energije, što je činilo 15% ukupne proizvodnje električne energije u svijetu, a 6% od svih vidova energije. Najveći proizvođači su SAD (809 miliona MWh), Francuska (419), Japan (241), Rusija (152), Južna Koreja (144), Njemačka (141), Kanada (89), Ukrajina (84), Kina (65), Švedska (61), Španija (56), V. Britanija (53) ... Procentualno učešće nuklearne energije u ukupnoj proizvodnji struje najveće je u Francuskoj (76%), zatim Litvaniji (73%), Slovačkoj (57%), Belgiji (54%), Ukrajini (48%), Švedskoj (42%), Sloveniji (42%), Jermeniji (40%), Švajcarskoj (39%), Mađarskoj (37%), J. Koreji (36%) itd. Na Slici 1. 3. data je hronologija udjela nuklearne energije u globalnom energetsom bilansu.

Još 52 reaktora, snage 48.000 MW, su u izgradnji – priključenja na mrežu očekuju tokom narednih 5–6 godina (većina u Kini, Rusiji, J. Koreji i Indiji). Odobreno je i u fazi pripreme za gradnju daljih 135 reaktora u 27 zemalja, sa 149.000 MW (ovi se očekuju za 8–10 godina), a u fazi planiranja su njih 295 u 36 zemalja sa 303.000 MW (za 15-ak godina).

Prilikom sagledavanja nuklearne energetike trebalo bi razlikovati tehničke, ekonomske, ekološke i sociopolitičke aspekte.

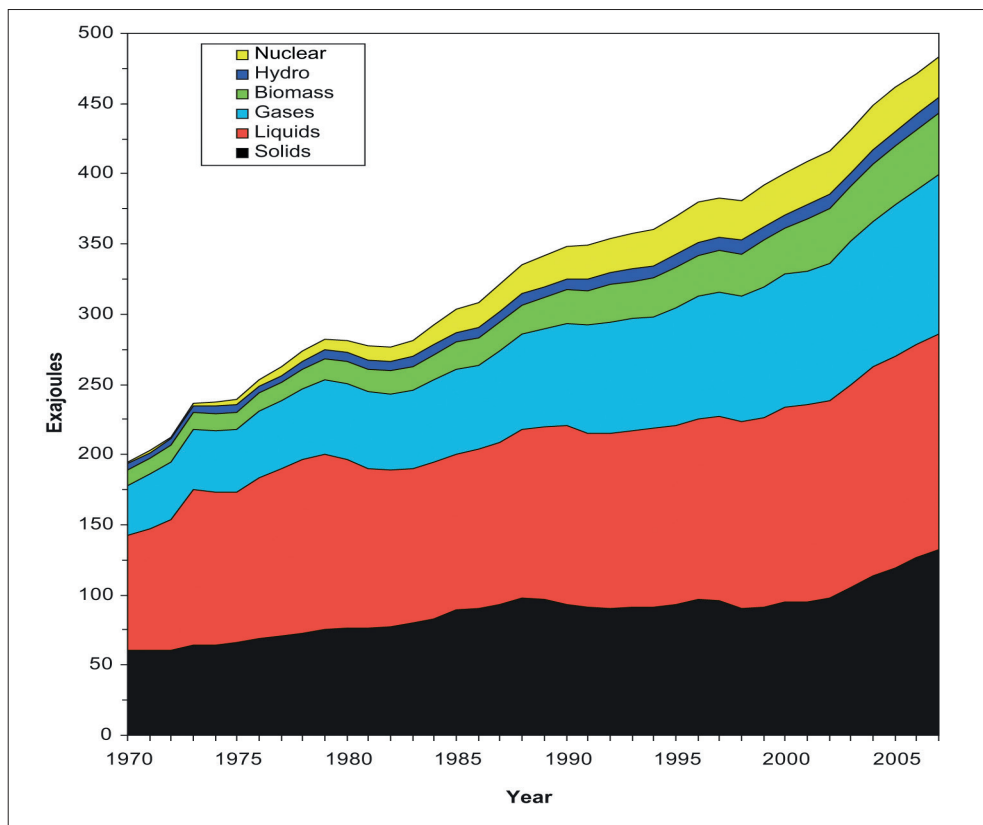
#### 1. 4. 1. TEHNIČKI ASPEKTI

Nuklearna elektrana (NE) je u osnovi toplotna mašina koja pretvara nuklearnu energiju, preko toplotne, u električnu. U principu je slična termoelektrani na fosilno gorivo (TE), tj. sastoji se od dva dijela – u prvom se iz goriva (nuklearnog kod NE, a fosilnog kod TE) dobija toplota u vidu pregrijane vodene pare (ili nekog drugog fluida), a u drugom se toplota pretvara u električnu energiju (električni generator na bazi parne turbine). Zbog termodinamičkih ograničenja u električnu energiju nije moguće pretvoriti više od 30 do 50% toplotne (zavisno od temperature radnog tijela – fluida) – preostali dio se oslobađa u okolinu, mada se može iskoristiti za grijanje ili neki toplotno zahtjevni tehnološki proces (npr. desalinizacija morske vode, ekstrakcija nafte iz naftnih škriljaca ili proizvodnja vodonika kao potencijalno značajnog energenta u budućnosti).

Pretvaranje nuklearne energije u toplotnu vrši se u reaktoru. Reaktor je cilindrični sud, dimenzija nekoliko metara, izrađen od specijalnog čelika debljine desetak centimetara. U reaktoru su – na način pogodan za odvijanje lančane nuklearne reakcije i za odvođenje oslobođene toplote – raspoređeni gorivo, moderator (usporivač neutrona) i kontrolni elementi, dok rashladni fluid struji između njih i odvodi toplotu prema izmjenjivaču toplote ili direktno na turbinu.

Nad reaktorom se obično podiže zaštitna betonska kupola (containment building), koja treba da zadrži radioaktivne materije u slučaju curenja iz reaktora. Raniji sovjetski tipovi NE nijesu imali ovakvu kupolu, što je značajno doprinijelo rasipanju radioaktivnosti i zagađenju okoline prilikom havarije u NE Černobil 1986. godine.

Nuklearno gorivo kod postojećih NE je uran (U). Uran je element s kraja periodnog sistema i prirodno se sastoji od nekoliko izotopa, od kojih su dva značajna: U–235, kojeg ima 0.720% i U–238 (99.275%). Kao gorivo služi samo U–235, čija se jezgra, pod uticajem neutrona, cijepaju u procesu fisije, oslobađajući fisione fragmente i



Slika 1. 3. Hronologija udjela pojedinih vidova enegije u globalnom energetskeom bilansu

nove neutrone za nastavak procesa („lančana reakcija”). Kinetička energija fisijonih fragmenata se u interakciji s okolnom materijom pretvara u toplotu, koju rashladni medijum odnosi van reaktora. Prilikom fisije i u nuklearnim reakcijama koje je prate stvara se velika količina radioaktivnih materijala.

Tipovi reaktora. Većina nuklearne energije u svijetu dobija se iz tzv. lakovodnih reaktora, tipa PWR (pressurized water reactor) ili BWR (boiling water reactor). Oni koriste obogaćeni uran, s nešto većim procentom U-235 od prirodnog (obično 3–5%) i običnu („laku”) vodu za hlađenje i moderaciju. Para je pregrijana i pod pritiskom kod PWR, a na običnom pritisku kod BWR. Kanadski PHWR (pressurized heavy water reactor) koristi obični uran i „tešku” vodu ( $D_2O$ ) pod pritiskom. Ruski RBMK (Реактор Большой Мощности Канальный) koristi laku vodu za hlađenje, prirodni ili nisko obogaćeni uran kao gorivo i grafit kao moderator. Kod GCR (gas cooled reactor) koriste se gasovi (npr. helijum) na temperaturama blizu  $1000^{\circ}C$ . Postoji još desetak tipova s raznim kombinacijama goriva, moderatora i radnog tijela-fluida.

Trenutnu strukturu tipova reaktora u svijetu značajno je odredila činjenica da je gorivo (uran) relativno jeftino i lako dostupno i da njegova cijena malo utiče na cijenu

električne energije iz NE. Ovim je težište razvoja nuklearne tehnologije pomjereno sa poboljšanja energetske učinka goriva na unapređenje pouzdanosti i sigurnosti, prvenstveno kroz pojednostavljenje svih faza tzv „gorivnog ciklusa” (ekstrakcija i obogaćivanje urana, sagorijevanje u reaktoru, tretman isluženog goriva).

Po principu „veliko je isplativije”, snaga novosagrađenih reaktora se stalno uvećava: od početnih 100–200 MW u prvoj generaciji šezdesetih godina do uobičajenih 1000–1700 MW danas (druga i treća generacija).

Gorivni ciklus. Uran se vidu uran-oktoksida  $U_3O_8$  nalazi u zemljinoj kori (prosječna koncentracija u zemljištu je 1–3 ppm). Komercijalno je isplativa ruda sa više od 1000 ppm (0.1%)  $U_3O_8$ , mada neki površinski kopovi vade i siromašniju rudu. Najveći proizvođači su Australija, Kanada, Kazahstan i Rusija. Uz predviđeni tempo rasta nuklearne energije, poznate rezerve su dovoljne za narednih 80–170 godina, zavisno od toga koji se nivo isplativosti za eksploataciju posmatra. U Japanu se značajno odmaklo s razvojem tehnologije za ekstrakciju urana iz morske vode, gdje ga ima u praktično neograničenim količinama (koncentracija 3.2 ppb).

Iz rude se flotacijom uz pomoć kisjelina izdvaja čisti  $U_3O_8$  („žuti kolač”). Žuti kolač je primarna sirovina kojom se trguje na berzi, uz odgovarajuću kontrolu i ograničenja zbog mogućih zloupotreba.

Daljom preradom u fabrikama nuklearnog goriva dobija se uran-dioksid  $UO_2$ , a iz ovog gasoviti uran-heksafluorid  $UF_6$ , koji je pogodan za „obogaćivanje” u gasnim centrifugama (povećanje koncentracije fisionog U–235 sa prirodnih 0.72% na 3–5%). Poslije obogaćivanja  $UF_6$  se vraća u oblik  $UO_2$ , koji se dalje sinteruje na 1400°C u cilindrične keramičke tablete standardne veličine (tipično 0.8 X 1.35 cm). Tablete se slažu u cirkonijumske šipke dužine 4–5 m, a ove u snopove, kojih u reaktoru bude 200–300 komada, stvarajući kritičnu masu za kontrolisanu lančanu reakciju. U jednom punjenju reaktora ima par stotina tona urana, što mu omogućava da radi nekoliko godina, poslije čega se zaustavlja radi zamjene goriva. Kod nekih reaktora zamjena goriva se može vršiti i bez zaustavljanja – istrošeni snopovi se vade i mijenjaju u hodu, jedan po jedan.

Istrošeno gorivo koje se vadi iz reaktora veoma je radioaktivno i odlaze se da odleži godinu-dvije u vodenim bazenima u krugu nuklearne elektrane, poslije čega se može i dalje ostaviti u bazenu ili prebaciti u specijalne „suve” kontejnere, koji idu na skladištenje. Mada se isluženo gorivo često smatra za nuklearni otpad, ono to praktično nije, jer sadrži oko 70% početnog U–235 (gorivo se mijenja kad se više ne može održavati kritična masa). Osim toga, prilikom stajanja u reaktoru značajan dio ne-fisionog U–238 pretvara se u fisioni materijal plutonijum Pu–239, koji predstavlja potencijalno dragocjenu sirovinu za gorivo. Oba se recikliranjem mogu izdvojiti iz isluženog goriva, čime se dobija novi tip goriva MOX (mixed oxide fuel), mješavina  $PuO_2$  i  $UO_2$ . Proces recikliranja je osjetljiv s aspekta bezbjednosti, jer se plutonijum može zloupotrijebiti za pravljenje nuklearnog oružja (prolifracija), pa su npr. obimni programi recikliranja napušteni u SAD, Njemačkoj i V. Britaniji. Postrojenja za reciklažu i reaktori na MOX rade u Francuskoj, Rusiji i Japanu.

Recikliranje je značajno i sa ekološkog stanovišta, jer se praktično eliminiše visokoradioaktivni otpad. Međutim, osim moguće proliferacije, niska cijena urana i procentualno malo učešće goriva u krajnjoj cijeni proizvedene električne energije ne



djeluju stimulativno na ovu opciju. U slučaju porasta cijene urana, MOX bi predstavljao praktično neiscrpn i izvor novog goriva, budući da je energetskej potencijal isluženog goriva i do 100 puta veći od već iskorišćene energije U-235.

Nuklearni otpad. U redovnom režimu rada NE stvara se veoma mala količina srednje i nisko radioaktivnog otpada koji se skladišti, a potom trajno odlaže na poznat i tehnički siguran način (tzv. plitko zakopavanje, „near surface disposal”), kao i sličan otpad iz medicinskih, industrijskih i naučnih aplikacija. Visokoradioaktivni otpad čini samo isluženo gorivo (ukoliko se ne reciklira) ili mali ostatak poslije reciklaže, smanjen po obimu do 50 puta. Ovaj se otpad skladišti u krugu NE ili u centralnim skladištima za više NE. Pitanje trajnog odlaganja je tehnički riješeno (duboko zakopavanje u stabilnim i nepropusnim geološkim slojevima, „deep geological disposal”), u par zemalja se prilično odmaklo i sa realizacijom (npr. Yucca Mountain odlagalište u SAD), ali se još nigdje ne primjenjuje. Jedan od razloga je pomenut – veliki preostali energetskej potencijal u isluženom gorivu, za koji se očekuje da jednog dana bude iskorišćen. Drugi razlog je iskustvo iz prakse da pravilno uskladišteno isluženo gorivo ne stvara probleme: zauzima relativno malo prostora, lako se nadzire, čuvanje malo košta... Na kraju, tu je i protivljenje javnog mnjenja u oblastima gdje bi se odlaganje-zakopavanje vršilo.

#### 1. 4. 2. EKONOMSKI ASPEKTI

Nuklearne elektrane su, po pravilu, krupni energetskej objekti, snage 1000 MW i više, koji predstavljaju veoma veliku investiciju – prosječno 1.5 milijardu EUR za 1000 MW. Na cijenu veoma utiču dužina gradnje, raspoloživost infrastrukture (elektroenergetske, komunikacione, kadrovske, pravne, administrativne itd.) i naročito dugoročna stabilnost ekonomskih, društvenih i političkih prilika. U Evropi i SAD gradnja traje 7–8 godina, ponekad 10 i više. Međutim, nekoliko novih NE u Kini sagrađeno je za 4–5 godina, po cijeni od 0.7 mld. EUR za 1000 MW.

Jednom u pogonu, NE radi praktično čitav svoj radni vijek punim kapacitetom, dajući ogromne količine bazne električne energije u sistem. Troškovi rada (gorivo, održavanje i tekući troškovi) su niski, pa je otplata investicije daleko najveća stavka u cijeni proizvedene električne energije. Većina današnjih NE pravljen je za radni vijek od 40 godina, ali se smatra da će bez poteškoća moći da dobiju dozvole i rade još 20 ili više. Savremeni reaktori se prave za radni vijek od najmanje 60 godina.

Prosječni faktor opterećenja („load factor” – stepen iskorišćenja instalisane, nominalne snage) za sve NE u svijetu zajedno danas iznosi 80% (u SAD, J. Koreji i još nekim zemljama i preko 90%), što je ključni faktor u ekonomiji NE – nijedan drugi vid proizvodnje električne energije nije ni blizu tolikog iskorišćenja instalisane snage (TE 40–50%, hidro 30–35%, vjetar 25%, itd). To praktično znači da NE od 1000 MW radi 8.000 sati godišnje, tj. daje 8 miliona MWh električne energije.

Cijena električne energije iz tipične NE (snaga 1000 MW, 1.5 mld EUR početna investicija, 7 godina gradnje, kamatna stopa 5%, rok eksploatacije 60 godina, 85% faktor opterećenja) je oko 2 centa za kWh – uključujući sve troškove, čak i izdvajanja za trajno zbrinjavanje otpada i dekomisiju (uklanjanje) reaktora na kraju radnog vi-

jeka. Ovo je ubjedljivo najniža proizvodna cijena od svih vidova energije – jedino TE na ugalj, ako se oslobode takse na zagađenje, tj. izuzmu iz principa „zagađivač plaća”, mogu biti konkurentne.

Gorivo (uran) učestvuje u cijeni struje svega 3–4%, tako da eventualne varijacije u njegovoj cijeni ne mogu značajno uticati na ekonomski bilans NE. Zalihe urana u svijetu su dovoljne, a proizvodnja stabilna (vodeći proizvođači Australija, Kazahstan, Kanada, Rusija). Iako je berzanski proizvod, više od 80% urana u svijetu se trguje kroz dugoročne ugovore, što je dodatni stabilizujući faktor. Relativno niskoj cijeni (50–80 USD/kg, za dugoročne ugovore 20–40 godina) doprinosi i velika količina urana iz rashodovanog nuklearnog oružja. Globalna godišnja potražnja urana za NE je oko 65 hiljada tona. Ako bi cijena iz bilo kog razloga drastično porasla, ekonomski bi postala opravdana i aktivirala se masovna proizvodnja MOX-a iz istrošenog goriva u skladištima, čime bi se cijena stabilizovala na nešto višem nivou, a pri cijeni od 700 USD/kg bila bi isplativa i ekstrakcija iz morske vode.

Pozitivan uticaj niske cijene električne energije na ekonomiju i životni standard očigledan je praktično svuda gdje su NE u pogonu. U ovom smislu ilustrativan je primjer razlike u energetske, pa i ekonomskim pokazateljima Francuske i Italije. Razlika (na štetu Italije) nastala je poslije referendumu 1987. godine, kojim je Italija odbacila NE (5 velikih NE, koje su tada davale 35% električne energije) i orijentisala se na uvoz struje, pretežno iz francuskih NE (paradoksalno, dobar dio ovih je blizu granice s Italijom). Danas je izvjesno da se Italija, poslije lošeg iskustva, vraća nuklearnoj opciji.

Veličina investicije u odnosu na veličinu ekonomije jedan je od limitirajućih faktora za uvođenje nuklearne tehnologije – smatra se da je BNP od 100 milijardi USD godišnje donja granica ekonomske moći društva koje bi željelo da ide u tom pravcu, što je za male zemlje uglavnom nedostižno.

### 1. 4. 3. EKOLOŠKI ASPEKTI

Suprotno rasprostranjenom mišljenju o velikoj štetnosti NE po zdravlje i životnu sredinu, činjenice pokazuju upravo suprotno – nuklearna energija je čista i ekološki najprihvatljivija od svih „krupnih” oblika proizvodnje električne energije. U toku rada elektrane zagađenje okoline po bilo kom osnovu je beznačajno – emisije radioaktivnosti praktično nema, a naravno ni štetnih gasova karakterističnih za termoelektrane, niti ima trajne degradacije ambijentalnih vrijednosti kao kod hidroelektrana. Kako je već rečeno, nuklearni otpad je relativno malog obima i u dosadašnjoj praksi nije predstavljao realni problem, niti ima razloga da to bude. Havarije tipa Černobila su moguće, ali malo vjerovatne (rizik je sastavni dio svake tehnologije) uz rigorozne mjere sigurnosti na koje ide i do 30% troškova u gradnji i tokom eksploatacije NE (više nego u avio-saobraćaju).

Sa aspekta uticaja na zdravlje i životnu sredinu, birati između nuklearne i neke druge opcije znači birati između moguće, malo vjerovatne štete i neizbježne, namjerne kontinuirane štete. Logično je izabrati ovo prvo, pa se potruditi da do potencijalne štete ne dođe – najrazvijenije i najveće zemlje svojim primjerom, makar i tiho, prednjače u takvom pristupu.

#### 1. 4. 4. JAVNO MNJENJE I POLITIČKI ASPEKTI

Jedan od ključnih faktora za razvoj nuklearne energetike je percepcija od strane javnog mnjenja. Na početku, šezdesetih godina, postojalo je uvjerenje da će nuklearna energija riješiti sve energetske probleme čovječanstva. Entuzijazam i ekspanzivan rast nuklearnog sektora sedamdesetih godina to su i nagovještavali. Međutim, već početkom osamdesetih raste protivljenje javnog mnjenja, koje poslije Černobilja 1986. dostiže kulminaciju – rezultat je dvadesetogodišnji zastoj u gradnji novih objekata i napuštanje nuklearnih programa u pojedinim zemljama. Izgleda da je ova faza pri kraju – već nekoliko godina govori se o „nuklearnoj renesansi”, mnoge nove NE se grade ili su u fazi planiranja. Nuklearni sektor prošao je put „od zvijezda do trnja ...” Da li „...i nazad”, možda je još rano reći.

Činjenica je, dakle, da je percepcija javnog mnjenja o nuklearnoj energiji evoluirala od izuzetno afirmativne do izuzetno negativne i odbojne. Ovo važi manje-više svuda, samo se razlikuju modaliteti ispoljavanja, odnosno političko uobličjenje tog raspoloženja – negdje se NE tolerišu, negdje ne. Nijedan drugi vid korišćenja energije nije praćen emotivnim reagovanjem tog intenziteta. Kako je došlo do promjene?

Po većini objektivnih pokazatelja, nuklearna energija je tehnološki i ekonomski superiorna, a ima i najmanje štetan uticaj na okolinu. Ipak, u javnom mnjenju, pogotovo na Zapadu, dominiraju negativni stereotipi, koji NE povezuju s nuklearnim oružjem, Hirošimom, Černobiljem, malignim oboljenjima i genetskim mutacijama, užasnim radioaktivnim otpadom i kontaminacijom, nuklearnim terorizmom i sl. Često već samo pominjanje pojma bekerel (Bq) izaziva negativnu reakciju, 100 Bq strah, a 1000 Bq paniku (prirodna radioaktivnost čovjekovog tijela je 4000 Bq)...

Iako prosječan građanin nije tehnički obrazovan do nivoa da može kompetentno da sudi o nuklearnim pitanjima, isto važi i za druge vidove energije, prema kojima nema tako odbojan stav. Jedan dio objašnjenja zašto je to tako leži u uticaju tzv. „fosilnog” lobija.

Vjerovatno najmoćnija interesna grupacija na svijetu u posljednjih 100–200 godina su proizvođači i prerađivači fosilnih goriva (uglja, nafte i gasa) – fosilni energentni čine 86% ukupnih svjetskih energetske izvora, a 64% u proizvodnji struje. Pojavom nuklearne energije nagoviješten je kraj ovoj dominaciji. Nova tehnologija isprva nije nailazila na otpor, možda i zato što se na fosilnoj strani nije vjerovalo u njeno brzo širenje. Međutim, kad je ekspanzija NE postala stvarnost, „fosilni lobi” pruža otpor – ne kroz utakmicu na tehnološkom, ekološkom ili ekonomskom planu (gdje vjerovatno ne bi imao objektivne šanse), nego preko javnog mnjenja, kod kojeg razvija negativnu percepciju o NE. Kasnija havarija u Černobilju bila je „dar s neba” – mada izolovan akcident u uslovima raspada sovjetskog sistema, Černobilj postaje kamen temeljac i ikona globalnog antinuklearnog pokreta.

Reakcija nuklearnog sektora u početku je izostala – smatralo se da je superiornost nuklearne energetske opcije toliko očigledna da ne može biti dovedena u pitanje. Međutim, nije bilo tako, a poslije Černobilja se od uloge negativca više nije moglo pobjeći.

Pomenuta percepcija NE uglavnom nije racionalna, nego emotivna. Kod NE nije prihvatljivo ono što kod drugih vidova energije jeste. Na primjer, 3 miliona ljudi go-

dišnje umire od posljedica zagađenja vazduha (ne računajući pušenje; podaci Svjetske zdravstvene organizacije) – uglavnom od fosilnih goriva, od čega veliki dio otpada na loženje uglja u TE. U rudnicima uglja svake godine ginu hiljade rudara... Ovo, u principu, izaziva mnogo manje pažnje od najave gradnje neke nove NE ili debate o hipotetičkim opasnostima nuklearne tehnologije. Ili, na protestima protiv radioaktivnih transporta, prirodna radioaktivnost okupljenih ponekad je veća od radioaktivnosti protiv koje protestuju...

Uticaj javnog mnjenja pretače se u političke stavove – svako javno zalaganje za nuklearnu opciju je nepopularno, bez obzira na argumente. Naravno, mnoge zemlje u tišini podržavaju i razvijaju svoje nuklearne programe – jednostavno zbog toga što je to najbolja opcija koju imaju.

#### 1. 4. 5. NUKLEARNI REAKTORI DANAS I SJUTRA

Prva generacija nuklearnih reaktora malih snaga (<200 MW) iz šezdesetih godina većinom je završila svoj radni vijek i ugašena je. U eksploataciji je tzv. druga generacija – reaktori veće snage (do 1500 MW), tehnološki napredniji i sigurniji, među kojima je najviše lakovodnih (PWR i BWR tipa).

Treću generaciju čine reaktori tzv. „evolutivnih” dizajna, kod kojih su optimizirana dosadašnja iskustva i koji upravo ulaze u pogon i činiće većinu novoizgrađenih do 2020. godine. Ovdje spadaju francusko-njemački Areva – EPR snage 1700 MW, američki Westinghouse AP-1000 (1000 MW), japanski Mitsubishi APWR od 1700 MW i ruski VVER od 1200 MW. Očekuje se da budu jeftiniji, brže se grade, povećane „pasivne” sigurnosti, jednostavniji za eksploataciju, bolje koriste gorivo i imaju duži radni vijek (najmanje 60–70 godina).

Principijeno različiti („inovativni”) reaktori četvrte generacije očekuju se poslije 2020. godine. Međunarodno stručno tijelo GIF (Generation IV International Forum), koje okuplja predstavnike 13 vodećih zemalja, od 2001. koordinira rad na razvoju nove nuklearne tehnologije. Za sada je izbor sužen na 6 mogućih opcija, među kojima će se za realizaciju odabrati jedna ili dvije. Izbor ide u pravcu tzv. brzih samooplodnih (fast breeder) reaktora, koji iskorišćavaju skoro čitav energetski potencijal urana, ostavljajući vrlo malo radioaktivnog otpada. Učinak će biti povećan i podizanjem radne temperature (radno tijelo biće npr. helijum, tečni natrijum, tečna so ili tečno olovo).

Rusija razvija male reaktore (100 MW) koji će se graditi na plovećim objektima (baržama) i locirati po potrebi, uglavnom u regionima intenzivne privredne aktivnosti na sjeveru Sibira. Ovo bi mogla biti zgodna, finansijski pristupačna i brzo izvodljiva opcija za male zemlje.

Razmatra se i korištenje torijuma (Th) kao goriva. Kao i uran, torijum je veoma rasprostranjen u zemljinoj kori, čak ga ima nekoliko puta više (prosječna koncentracija 6 ppm), a velika nalazišta rude monazita (torijum-fosfat) posvuda (Indija, SAD, Australija, Venecuela, Turska, Rusija, Brazil, Norveška, Egipat...) nadmašuju sve poznate rezerve urana.

#### 1. 4. 6. CRNA GORA I NUKLEARNA OPCIJA

Rečeno je već da nuklearna tehnologija zahtijeva velika ulaganja, krupnu ekonomiju sa razvijenom infrastrukturom (komunikacije, prenosna mreža, kadrovi, pravni, finansijski i administrativni okvir ...), ekonomsku, socijalnu i političku stabilnost i dugoročnu posvećenost realizaciji ovako zahtjevnog cilja. Jasno je da to nijesu uslovi koje male zemlje, čak i značajno veće od Crne Gore, mogu jednostavno postići – na stranu što tranzicija po definiciji nije sinonim za stabilnost. Ne samo Crna Gora nego vjerovatno nijedna od zemalja u našem regionu ne bi bila u stanju samostalno da se upusti u nuklearnu tehnologiju.

Posljednjih nekoliko godina, uz 30 zemalja koje već imaju NE, još 30-ak se zvanično obratilo Međunarodnoj agenciji za atomsku energiju za pomoć oko uvođenja nuklearne tehnologije. Od zemalja u regionu to su učinile Hrvatska, Albanija i BiH. Ne ulazeću u izvjesnost gradnje NE u Albaniji, za nas je važno da je potencijalna (tehnički optimalna) lokacija priobalni pojas od rta Palit kod Drača do ušća Bojane (gledaju se infrastruktura, konfiguracija terena, dostupnost vode za hlađenje, pravac morskih struja, ruža vjetrova ...). U BiH jedna od mogućih lokacija je Bilečko jezero.

Neke od malih zemalje udružuju se radi zajedničke gradnje NE. Najdalje su otišli baltički susjedi Estonija, Letonija, Litvanija i Poljska, koje će zajednički podizati 2 X 1700 MW (Areva EPR reaktori) na lokaciji stare NE Ignalina na jezeru Drukšaj. Od-luka sada prolazi parlamentarne potvrde.

Zatvaranje blokova 3 i 4 NE Kozloduj u Bugarskoj krajem 2006. godine (uslovljeno ulaskom u EU; stari tip sovjetskih reaktora) dovelo je do debalansa električne energije u regionu. Bugarska je na putu da ugašene reaktore zamijeni novim, modernijim, ruske proizvodnje (NE Belene, 2 X 1000 MW).

Koliko je nerealno razmišljati o gradnji NE u Crnoj Gori, toliko je realno i razumno ostaviti otvorena vrata za priključenje nekoj eventualnoj budućoj zajedničkoj gradnji sa susjedima. Većina njih je u sličnoj energetskej situaciji kao Crna Gora. Albanija, Hrvatska, Makedonija i Grčka ozbiljno i zvanično razmatraju nuklearnu opciju. Turska i Italija takođe.

Svoj Zakon o zaštiti od zračenja („Sl. list Crne Gore”, 56/09), kojim se „zabranjuje izgradnja nuklearnih elektrana, postrojenja za proizvodnju nuklearnog goriva i postrojenja za prerađivanje isluženog nuklearnog goriva” (čl. 17), susjedima ne možemo nametati, ali možemo razmišljati o mogućoj svojoj koristi ako se oni okrenu nuklearnoj opciji. Za početak, pomenutu besmisleni zakonsku odredbu (zabranu nedostižno-nemogućeg) trebalo bi ukloniti – nije čak jasno je li izraz političke ili činovničke volje. Jedino što ona ograničava je naše moralno pravo da sa susjedima nekad sjednemo i razgovaramo o nečemu obostrano korisnom.

#### 1. 5. BIOGORIVA

Bioenergija (energija iz biomase) danas ima najveći udio u ukupnoj korišćenoj energiji iz primarnih, kao što i biomasa predstavlja najveći tehnički potencijal među obnovljivim izvorima. Biomasa je organski materijal, solarnog porijekla, uzgajan ili sakupljan za energetske potrebe i predstavlja obnovljivi izvor ugljenih hidrata koji se

mogu efikasno konvertovati u toplotu, elektricitet i goriva za transport. Koriste se donedavno živi ili čak i živi biomaterijali, za razliku od fosilnih goriva koja su nastala od biomase prije više miliona godina.

Biomasa se danas, u najvećoj mjeri, koristi na krajnje neefikasan način, prvenstveno za kuvanje i zagrijavanje prostora. Od ukupno korišćenih količina čak dvije trećine otpada na podmirenje ovih potreba, a od toga najveći dio na zemlje u razvoju (sa najbrojnijim stanovništvom) i, uopšte, ruralna područja.

Prema ACT i BLUE scenariju, međutim, do 2050. godine, treba očekivati nove, unaprijeđene tehnologije i nove generacije biogoriva, koje će korišćenje biomase učiniti znatno efikasnijim od današnjeg. Osnovni resurs za razliku od sadašnjeg, konvencionalnog, predstavljaće šumski i otpad od usjeva, kao i tzv. energetski usjevi. Raspoložive količine biomase zavisice od efikasnosti mjera preduzetih u poljoprivredi i šumarstvu, a njeno korišćenje ce biti diverzifikovano kroz proizvodnju toplote i električne energije (ili kombinovano), tečnih goriva za transport, biohemikalija i drugih biomaterijala. Zbog toga ce potrebe za biomasom narasti za četiri puta u odnosu na današnje. Predviđa se da ce udio biomase u ukupnoj proizvodnji različitih energetskih formi iz primarnih izvora, do 2050. godine, dostići 23% (150 EJ/god.), dok ce ona istovremeno predstavljati najvažniji obnovljivi izvor. Od, kako se procjenjuje, potrebnih 15 Gt/g, polovina ce poticati od šumskog i poljoprivrednog otpada a polovina od energetskih usjeva. Za proizvodnju električne energije i biogoriva koristiće se oko 40% biomase (sa podjednakim udjelima), a ostatak za kuvanje, grijanje, industriju i biohemikalije.

Biogoriva bi u budućnosti mogla odigrati veoma važnu ulogu u transportu, kao djelimična ili potpuna zamjena za konvencionalni benzin i dizel, što bi omogućilo sniženje nivoa neto emisije gasova staklene bašte (posebno CO<sub>2</sub>). Tokom rasta biomase iz atmosfere se, kroz fotosintezu, hemijski vezuje CO<sub>2</sub>. Njenim naknadnim korišćenjem (spaljivanjem ili konverzijom u biogoriva i njihovom upotrebom) emituje se jedanput već sekvestrirani CO<sub>2</sub> i ostvaruje nulta neto emisija. U prvom planu je biodizel koji bi se koristio za teška vozila, brodove i avione. Prema BLUE scenariju, zastupljenost biogoriva u transportu, do 2050. godine, iznosiće 26%, dok ce ukupno zemljište, angažovano za obezbjeđenje potrebne biomase, iznositi 4% od raspoloživih pašnjaka i obradivih površina.

Danas se za proizvodnju biogoriva uglavnom koriste usjevi (kukuruz, uljana repica, soja, suncokret..., u Brazilu šećerna trska), što izaziva ozbiljne konflikte sa drugim sektorima. Širenje površina pod biomasom za proizvodnju goriva ozbiljno prijete nestašicama hrane i njenim značajnim poskupljenjem. Prelaskom sa prve generacije goriva (iz zrna i materijala bogatih biljnim uljima) na drugu (uglavnom ligno celulozni materijali), konflikt bi bio znatno ublažen, a emisija CO<sub>2</sub> dodatno redukovana, u odnosu na fosilna goriva. Korišćenjem otpadnih materijala za proizvodnju biogoriva, ali i uvođenjem drugih energetskih izvora, bitno ce se umanjiti i potrebe za drvnom masom.

Potreba za radikalnom redukcijom neto emisije CO<sub>2</sub> u sektoru transporta, čak do vrijednosti bliskih nuli, zahtijeva prelazak sa konvencionalnih fosilnih goriva na nisko emisiona, kao što su elektricitet, vodonik i biogoriva. Pri proizvodnji biogoriva (tečnih ili gasovitih) za transport, takođe se zahtijeva što niže učesće energije iz fosila.



Pitanje mogućeg nivoa produkcije biogoriva na održivi način do 2050. godine i njihovog uticaja na ekosistem, i dalje je otvoreno. Uticaj ove proizvodnje na raspoloživost i cijene hrane, uticaj biogoriva na vodene resurse, biodiverzitet i drugi, mogu značajno ograničiti njihovu upotrebu u budućnosti. Razvoj naprednih tehnologija za tretman otpadne biomase i novi naučni proboji u oblasti hemije, biologije, biohemije i biotehnologije pomoći će da se današnji problemi prevaziđu.

Biogoriva se mogu podijeliti na različite grupe, ali se to najčešće čini po tipu goriva (tečno ili gasovito), porijeklu ili konverzionom procesu. Tečna biogoriva (etanol, dizel) uveliko dominiraju nad gasovitim (metan, vodonik) zbog bolje kompatibilnosti sa motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem i potrebnom infrastrukturom za transport i distribuciju. Podjela po tipu konverzionog procesa zavisi od toga kojoj generaciji goriva pripadaju. Dok se prva generacija proizvodi, na konvencionalan način, iz biomase koja se koristi i za proizvodnju hrane, druga se dobija iz ligno celuloznih materijala, dok bi treća generacija bila ulja iz algi i butanol, ali sa veoma malim predviđenim učešćem do 2050. godine. Akcenat u istraživanju i razvoju je na gorivima druge generacije, čime bi se osigurali visoki prinosi i niska emisija. Moguće je da će ova generacija goriva, kao zamjena konvencionalnom benzinu i dizelu, u skoro vrijeme postati komplementarna, ili će čak nadmašiti goriva prve generacije, na komercijalnom nivou. Predviđa se da će, od danas korišćene biomase, samo šećerna trska zadržati svoje mjesto i u budućnosti.

Očekuje se da će, u vremenu pred nama, za pogon lakih vozila, osim biogoriva, biti korišćena i druga rješenja (električna vozila na baterije ili gorivne ćelije), dok će se kod teških vozila, brodova i aviona pretežno koristiti biogoriva druge generacije. Osvajanje tehnologija za celulozne materijale je najvažniji cilj, a intenzivno se radi na enzimskoj hidrolizi celuloze kao i na gasifikaciji i Fischer-Tropsch-ovom procesu.

Po pitanju komercijalne gasifikacije biomase stavovi su podijeljeni, prvenstveno zbog niske efikasnosti i neekonomičnosti postupka. Rješenja se moraju tražiti kroz razvoj novih tehnologija i materijala. Međutim, jedinstven je stav da se potrebe za biomasom za proizvodnju električne energije i sintetičkih goriva po Fischer-Torpsch-ovom postupku ne mogu dostići, ukoliko tehnologija gasifikacije ne bude u potpunosti osvojena i uhodana.

Goriva prve generacije, koja se danas uglavnom i koriste, proizvode se na konvencionalan način, iz uzgajane biomase bogate šećerom i skrobom (šećerna trska, kukuruz, pšenica, šećerna repa...), odnosno biljnim uljima ili životinjskim mastima (soja, suncokret, palmino ulje, alge, životinjski otpad...). U prvom slučaju se fermentacionim postupkom dobija etanol, dok se u drugom, hemijskim procesiranjem, proizvode biodizeli.

*Biljna ulja.* Koriste se već upotrijebljena ili jestiva ulja nižeg kvaliteta. Zagrijavanjem se podešava viskozitet na nivo dizela. Ulja i masti mogu, takođe, hidrogenacijom dati veoma kvalitetne zamjene za dizel.

*Biodizel.* Najkorišćenije biogorivo u Evropi je upravo biodizel. Dobija se transesterifikacijom ulja i masti i veoma je sličan konvencionalnom dizelu. Čisti biodizel, pri sagorijevanju, emituje manje CO<sub>2</sub> od mineralnog, zbog nižeg sadržaja ugljenika i povećanih količina vodonika i kiseonika. Obično se koristi u smješi sa konvencionalnim dizelom, najčešće sa udjelom do 15%. U mnogim evropskim zemljama je u

upotrebi smjesa sa 5% biodizela i dostupna je na većini pumpnih stanica. Veoma je siguran pri transportu i rukovanju, niske je toksičnosti i sa visokom tačkom paljenja. Proizvodnja veoma brzo raste, pogotovo u SAD i Evropi.

*Bioalkoholi.* Dobijaju se djelovanjem mikroorganizama na šećer i skrob kroz proces fermentacije. Najčešće se radi o etanolu, rjeđe o propanolu i butanolu. Ipak, treba napomenuti da butanol može poslužiti kao direktna zamjena za benzin, bez potrebe za podešavanjem motora. Takođe je energetski bogatiji, manje koroziono agresivan i higroskopan od etanola. Može se transportovati i distribuirati preko postojeće infrastrukture. Međutim, etanol se, iz ove grupe goriva, danas najviše koristi. Dobija se iz kukuruza, pšenice, šećerne trske ili bilo koje biomase koja može poslužiti za proizvodnju alkoholnih pića (krompir, voćni otpad...). Postupak obuhvata prevođenje skroba u šećer, fermentaciju, destilaciju i sušenje. Energetski je najzahtjevnija destilacija, a obično se koristi toplota dobijena iz fosilnih izvora.

Bioetanol služi kao zamjena za benzin, sa kojim se miješa u svim odnosima, a najčešće sa udjelom do 15%. Danas se, međutim, proizvode automobili koji mogu koristiti bilo koju kombinaciju, čak i čisti etanol. Oktanski broj etanola (efikasnost rada motora) je veći od benzinskog, ali mu je gustina energije niža i po masi i po zapremini. Koroziono je veoma agresivan prema metalima i gumi i zbog toga ne može biti transportovan naftnim cjevovodima, niti korišćen za avionska goriva. Takođe je i veoma higroskopan.

Imajući u vidu složenost i energetsku zahtjevnost ukupnog procesa proizvodnje bioetanola iz biomase, energetska vrijednost dodata kod krajnjeg potrošača je veoma mala. Takođe je otvoreno i pitanje neto bilansa CO<sub>2</sub>, ukoliko se uzme u obzir potrebna energija i njeno porijeklo za: pripremu zemljišta, transport, navodnjavanje, fertilizaciju, zaštitu, destilaciju i sušenje. Izraženije negativne neto emisije se mogu očekivati tek sa povećanjem zastupljenosti obnovljivih izvora iznad 20%.

Metanol se, kao gorivo, koristi znatno manje od etanola, iako se njegovim sagorijevanjem u motorima ili gorivnim ćelijama postižu visoke efikasnosti, uz mali uticaj na okruženje (visok odnos vodonika i ugljenika). Proizvodi se uglavnom iz prirodnog gasa, ali su sve više zastupljene tehnologije gasifikacije biomase uz sintezu produkata do metanola. U razvoju su, takođe, i novi, obećavajući postupci proizvodnje metanola iz atmosferskog CO<sub>2</sub> ili otpadnih gasova iz elektrana na fosilna goriva. Ovim bi se, pored efikasne produkcije goriva, obezbijedila i potpuna reciklaža CO<sub>2</sub>. Hidrogenacija ovoga gasa se dramatično ubrzava djelovanjem različitih katalizatora, obično elektro ili foto-tipa. Najnoviji pristup uključuje enzimске katalizatore, otvarajući perspektive za veoma efikasnu, niskotemperaturnu konverziju CO<sub>2</sub> u metanol.

Stoga se, kao protivteža vodoničnoj ili etanolskoj, sve više promovise ideja metanolske ekonomije, koja bi, prvenstveno, našla primjenu u transportu, sa ciljem supstitucije fosilnih goriva. Glavne prednosti metanola u odnosu na vodonik su: efikasno skladištenje bez potrebe za sistemima pod pritiskom, mogućnost korišćenja postojeće benzinske infrastrukture bez izgradnje nove (slučaj vodonika), sa benzinom se miješa u svim odnosima, predstavlja vrijednu sirovinu u hemijskoj industriji itd. U poređenju sa etanolom, osnovna prednost je u mogućnosti dobijanja iz bilo kojeg organskog materijala, Fischer-Tropsch-ovim postupkom, nakon gasifikacije. Nedostaci metanolske eko-

nomije su, takođe, brojni: visoki utrošak energije pri gasifikaciji i nečista proizvodnja, i dalje se proizvodi iz fosila, ima nisku energetskeu gustinu, higroskopan je i otrovan.

*Bioetri.* Koriste se za povećanje oktanskog broja motornih goriva.

*Biogas.* Dobija se iz biomase postupkom anaerobne digestije, spontano ili vještački. Koriste se biorazgradljivi otpad ili energetskei usjevi. Biogas sadrži metan, koji je manje čist ako se proizvodnja obavlja spontano, na deponijama organskog otpada. Hvatanjem deponijskog gasa i njegovim korišćenjem za proizvodnju toplote i/ili električne energije, postižu se znatne uštede i sprečava emisija metana u atmosferu, kao i njegov uticaj na globalne klimatske promjene. Iz organskog otpada se mogu dobiti i ulja slična nafti, postupkom termalne depolimerizacije.

*Sintetički gas.* Predstavlja smještu CO i vodonika, uz nešto viših ugljovodonika. Proizvodi se djelimičnim sagorijevanjem biomase u manjku kiseonika. Sam gas je efikasnije i čistije gorivo od originalne sirovine. Može se koristiti direktno u motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem ili gasnim turbinama. Služi i za proizvodnju vodonika i metanola, kao i za dobijanje niza tečnih goriva, Fischer-Tropsch-ovim postupkom.

*Čvrsta biogoriva.* Ovoj grupi pripadaju: drvo, piljevina, sijeno, ćumur, poljoprivredni otpad, energetskei usjevi i suvi životinjskei otpad. Rasuta masa se prije upotrebe presuje. Iako se često misli da je svježta biomasa prirodno čisto gorivo, pri sagorijevanju se izdvajaju značajne količine polutanata, od kojih su posebno opasni PAH-ovi. Briketirana goriva od poljoprivrednog otpada sagorijevaju uz izdvajanje takođe opasnih i kancerogenih dioksina i hlorfenola. Upotreba ćumura, dobijenog pirolizom biomase, poželjna je jer zamjenjuje drvo i drvni ćumur, smanjujući deforestaciju.

Druga generacija biogoriva je u razvoju, sa izgledima da bude, u srednjoročnom periodu, komercijalno konkurentna prvoj. Njihova proizvodnja će, prema BLUE scenariju, do 2030. godine narasti za više stotina puta. Dobijaju se uglavnom u tečnoj formi, iz biomase koja se ne koristi za proizvodnju hrane niti za dalju preradu: otpadna biomasa, stabljike pšenice i kukuruza, manje vrijedno drvo i energetskei usjevi. Posebna pažnja je fokusirana na razvoj tehnologija za dobijanje biovodonika, biometanola, Fischer-Tropsch-ovog dizela itd. Proizvodnja etanola iz celuloznih materijala, za koju se može reći da je u središtu pažnje, danas je skup i komplikovan postupak. Rješenja se traže kroz oponašanje procesa u organima za varenje biljojeda, gdje se celuloza, dejstvom enzima, prevodi u šećer. Glavni cilj je pronalaženje pogodnog sintetičkog ili prirodnog katalizatora. Značajan napredak je već napravljen.

Treća generacija biogoriva, prvenstveno, obuhvata alge i ulja koja se iz njih mogu dobiti. Energetskei potencijal ove biomase je čak 30 puta veći, po jedinici korišćene površine, od konvencionalnog. Alge se mogu lako uzgajati u bazenima, dok je ekstrakcija ulja veoma komplikovana i trenutno neekonomična. Rečeno je da se biogoriva, uglavnom, dobijaju iz već uginule biomase, ali se otvara i mogućnost sakupljanja etanola iz prirodnog procesa, kod nekih vrsta živih algi. Jedna od mogućnosti, koja se ozbiljno razmatra, je i uzgoj biomase otporne na so, u pustinjским priobalnim područjima, uz naknadno procesiranje do biogoriva.

Već danas, očigledno, postoje realne i široke tehnološke mogućnosti za proizvodnju biogoriva. Upotreba obnovljive biomase, u ove svrhe, doprinosi značajnim ušte-

dama nafte, uvećanju energetske efikasnosti i redukciji emisije gasova staklene bašte. Korišćenjem usjeva, kao sirovine, otvara se, međutim, niz konflikata koji dovode u pitanje ukupnu održivost ideje. No, osvajanjem proizvodnje goriva druge (realno očekivati) i treće generacije (pomjereno za dalju budućnost), prodirće se u zonu bez ozbiljnijih sukoba sektora energije sa drugim oblastima od životnog interesa, uspostavljene ravnoteže CO<sub>2</sub> ciklusa i osiguranja, barem dijela, održive energije za budućnost. Prije toga su, ipak, potrebni značajni prodori u oblasti hemije, biologije, biohemije i biotehnologije, čime će se omogućiti dizajniranje energetski visokoeffikasne biomase, sa potencijalom daleko iznad današnjeg.

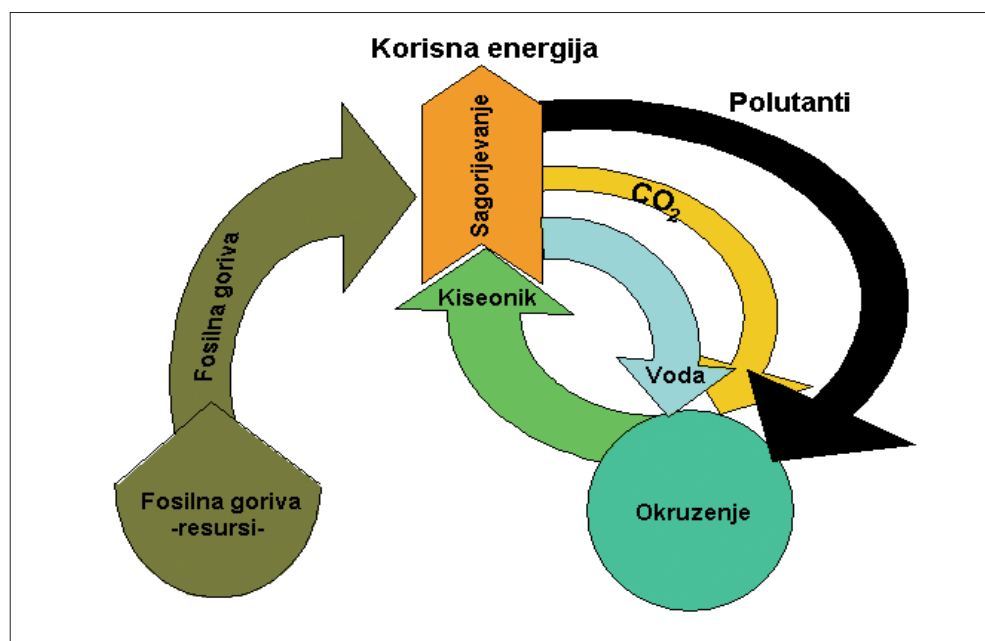
U okviru ovog poglavlja treba pomenuti i neke ideje i početne korake, koje bi imale revolucionarni značaj u rješavanju pitanja sigurne, dovoljne i čiste energije. Zasnivaju se na oponašanju poznatih (u određenoj mjeri) prirodnih procesa. Svjesni, za sada, nedostižne efikasnosti procesa u biološkim sistemima, davnašnji je izazov ostvariti njihovu vještačku repliku. U fokusu je, naravno, proces fotosinteze kroz koji biljke kombinuju CO<sub>2</sub> i vodu iz okruženja sa sunčevom svjetlošću, proizvodeći ugljene hidrate. Na ovaj način obezbjeđuju energiju potrebnu za život i rast. Suština lakog i permanentnog odvijanja ovih procesa je u katalizovanju reakcija razlaganja vode i prevođenja CO<sub>2</sub> u organske forme, uz pomoć prirodnih katalizatora. Prodorom u oblast nano nauka i tehnologija, čime će se omogućiti dizajniranje a ne, kao do sada, „pronalazak” potrebnih materijala, kao i u zonu detaljnog poznavanja kinetike i mehanizama hemijskih reakcija na atomskom nivou, stvoriće se prostor za odvijanje vještačkih procesa sa efikasnošću ravnom biološkim procesima. Dobijanjem goriva iz ovako proizvedenih organskih materijala, ili pak njihovom direktnom upotrebom, obezbijediće se obilje energije, dok će ravnoteža CO<sub>2</sub> ciklusa biti u potpunosti održana.

## 1. 6. VODONIČNA EKONOMIJA

Sintagma „vodonična ekonomija”, koja podrazumijeva proizvodnju, transport i distribuciju, skladištenje i finalnu upotrebu vodonika, bolje odslikava kompleksnost i sveobuhvatnost vizije rješavanja energetskih i sa njima povezanih problema u okruženju od često korišćenog termina „vodonična energija”, čije je značenje znatno uže.

Međusobno suprotstavljeni zahtjevi za dupliranjem globalnih energetskih potreba do 2050. godine, sa jedne, i neophodnosti upotrebe čistih energetskih izvora, koji neće izazivati dalji rast CO<sub>2</sub> i drugih polutanata u okruženju, sa druge strane, sve više usmjeravaju pažnju na mogućnosti vodonične ekonomije, kao na dugoročno rješenje za sigurnu i čistu energetska budućnost.

Kako je današnji energetski sistem neodrživ (Slika 1. 4), dugoročna rješenja se moraju tražiti kroz povećanje udjela obnovljive energije (hidro, solarna, vjetar, biomasa, geotermalna...) do nivoa zadovoljenja potreba, bez ugrožavanja životne sredine. Najznačajnije prednosti obnovljive u odnosu na neobnovljivu energiju su: besplatna je i raspoloživa u ogromnim količinama, uglavnom je ravnomjerno raspoređena (izuzimajući hidro), čista i sa stalnim resursima. Međutim, brojni su i nedostaci: raspoloživost je nestalna i sa promjenljivim intenzitetom, sami intenziteti su specifično niski zbog potrebe za velikim područjima za korišćenje i konverziju (pretvaranje solarne

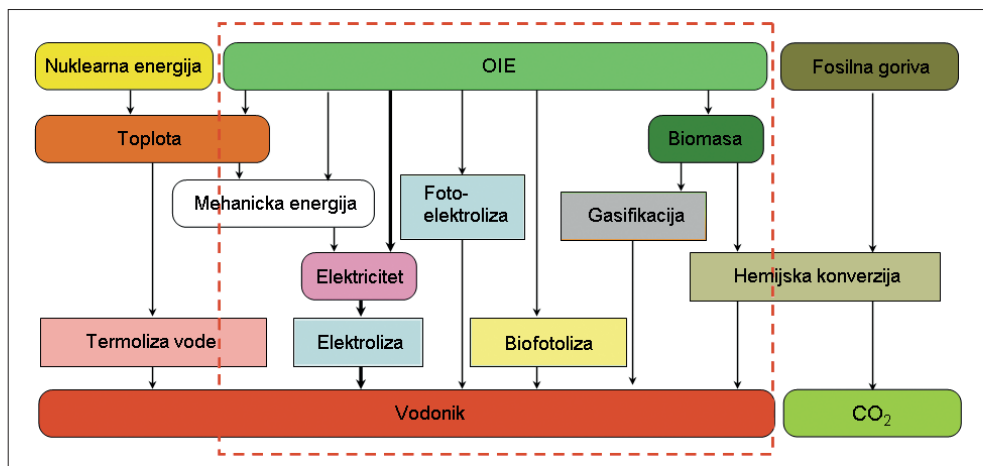


Slika 1. 4. Neodrživi energetski sistem (F. Barbir)

ili energije vjetra u električnu, uzgajanje biomase, akumulaciona jezera...), obično je raspoloživa na većim udaljenostima od glavnih potrošača (potreban nosač), tehnologije i oprema za korišćenje i konverziju su skupi i nije pogodna za direktnu upotrebu u transportu. Za sami transportni sektor, sada u potpunosti oslonjen na naftu, u budućnosti će biti potrebna efikasna i obnovljiva goriva, koja će ispunjavati nekoliko ključnih zahtjeva: mogućnost transporta i skladištenja, efikasnu konverziju u druge energetske forme (toplota, elektricitet, mehanički rad) i benigni uticaj na okruženje. Neke od ovih uslova zadovoljavaju elektricitet i biogoriva, ukoliko su proizvedeni bez učesća energije iz fosila, ali se, kao na perspektivno gorivo budućnosti, danas računa na vodonik.

U prirodnim uslovima vodonik je gas, bez boje mirisa i ukusa, nije otrovan, lakši je od vazduha i zapaljiv i najzastupljeniji je element u prirodi. Zbog visoke hemijske reaktivnosti, praktično ne postoji u elementarnoj formi. Kao gorivo budućnosti, može se dobiti uz pomoć bilo kog energetskog izvora, dok je, na duži rok, posebno interesantan onaj proizveden iz obnovljivih izvora (Slika 1. 5).

Ali prije nego što vodonična ekonomija postane realnost, potrebno je ukloniti dvije glavne prepreke. Prva je, svakako, potpuno odsustvo infrastrukture koja bi povezivala proizvodnju, transport, skladištenje i finalnu upotrebu vodonika, a koja postoji za fosilna goriva i elektricitet. Druga barijera je tržište, na kome vodonik tek treba da dokaže svoju konkurentnost. Iako ima niz prednosti u odnosu na konvencionalna goriva, vrijeme kada će moći da ih uspješno zamijeni još je daleko, jer je jaz



Slika 1. 5. Proizvodnja vodonika iz obnovljivih izvora energije (F. Barbir)

između danas mogućeg i u budućnosti zahtijevanog isuviše dubok. Načini njegove proizvodnje, skladištenja i krajnje upotrebe su daleko od potrebnog nivoa efikasnosti i biće neophodna dramatična unapređenja. Očigledno je da su, kao i u prethodno navedenim slučajevima, potrebni suštinski proboji u razumijevanju i kontroli hemijskih i fizičkih procesa, dizajniranju novih materijala i njihovoj karakterizaciji. Neophodno je osvojiti sasvim nove tipove membrana, katalizatora i sklopova kod gorivnih ćelija, koji će imati znatno bolje performanse, ali i daleko nižu cijenu od današnje. U fokusu su nano nauke i tehnologije od kojih se očekuje da riješe najveći dio problema.

Zbog izuzetno rijetkog postojanja u slobodnoj formi, vodonik, kao ni elektricitet, nije primarni energetska izvor već nosač energije. Riječ je, dakle, o medijumu preko koga se energija, od izvora, transportuje na velika rastojanja ili skladišti do finalne upotrebe.

Proizvodnja vodonika je, kao prvi korak u lancu vodonične ekonomije, moguća različitim postupcima i iz različitih izvora. Danas se najčešće dobija iz fosilnih goriva (uglavnom iz prirodnog gasa), konverzijom biomase i elektrolizom vode, dok se u budućnosti računa i na fotoelektrolizu, biofotolizu i termohemijsko razlaganje vode. Tehnologije koje nijesu zasnovane na ugljeniku, uključujući i one koje jesu, ali bez neto proizvodnje  $\text{CO}_2$ , mogu obezbijediti dovoljne količine vodonika za puni efekat vodonične ekonomije. Glavni resursi za ovakve postupke su biomasa, sunce, vjetar i nuklearna energija, a u manjoj mjeri i geotermalna. Svaka od tehnologija ima svoje probleme i izazove, mada su potrebe za unapređenjem hemijskih procesa, katalizatora, materijala i separacionih postupaka zajedničke za sve.

*Proizvodnja vodonika iz fosilnih goriva.* Vodonik se iz fosilnih goriva danas proizvodi na industrijskom nivou, uglavnom postupkom parne reformacije prirodnog gasa. Koristi se u naftnoj, hemijskoj i industriji đubriva. Ugalj i biomasa takođe mogu poslužiti za dobijanje vodonika na large-scale nivou, upotrebom iste tehnologije, ali



uz dvostruko veću emisiju CO<sub>2</sub>. Primjenom postupka izdvajanja i sekvenciranja gasa problem je moguće riješiti, uz dodatne troškove, čime bi uglj, zbog prihvatljive cijene i raspoloživosti, mogao postati značajna sirovina za vodonik u srednjoročnom periodu. U razvoju su dvije nove tehnologije za proizvodnju vodonika iz uglja i biomase: reformacija uz parcijalnu oksidaciju i metod kombinovanog ciklusa uz korišćenje Ca(OH)<sub>2</sub>, koji apsorpcijom CO<sub>2</sub> ubrzava proces reformacije.

Vodonik dobijen parnom reformacijom prirodnog gasa i uglja nije dovoljno čist za direktnu upotrebu u nisko temperaturnim gorivnim ćelijama. Problem je u prisustvu ugljen- monoksida u struji gasa, koji djeluje kao otrov na anodni katalizator. Uklanjanje CO, međutim, dodatno poskupljuje proces. Radi se na razvoju katalizatora tolerantnih na CO, kao i na unapređenju separacionih membranskih procesa.

*Proizvodnja vodonika elektrolizom vode.* Postupak je odavno poznat. Sastoji se u razlaganju vode na konstituente (vodonik i kiseonik), propuštanjem jednosmjerne električne struje kroz elektrohemijski sistem. Dobijeni vodonik je veoma čist i može se direktno koristiti u gorivnim ćelijama. Zbog visoke cijene električne energije postupak je skup u odnosu na parnu reformaciju. Teorijski, reakcija razlaganja vode se odvija pri naponu od 1,23 V, ali zbog sporosti hemijskih reakcija (posebno kiseonične) i prisustva niza otpornih mjesta, stvarni napon je znatno viši. Energetska efikasnost se kreće oko 75%, ali može biti optimizirana korišćenjem visokoaktivnih elektrokatalizatora (uglavnom plemeniti metali) ili radom na povišenim temperaturama.

*Proizvodnja vodonika solarnim postupcima.* Već je konstatovano da proizvodnja vodonika parnom reformacijom fosilnih goriva uključuje značajne emisije CO<sub>2</sub>, što bi moglo dovesti u pitanje ukupne efekte vodonične ekonomije. Uspostavljanjem tzv. solarno-vodoničnog sistema, koji za dobijanje vodonika koristi obnovljivu sunčevu energiju, postupak se, u potpunosti, dekarbonizuje.

Elektrolizom vode pomoću fotovoltaičkih sistema, direktnom fotoelektrolizom bez upotrebe električne energije, fotobiološkim razlaganjem ili korišćenjem solarne energije za termohemijsko razlaganje vode, u potpunosti bi se uspostavio održivi sistem, uz obilje čistog vodonika.

Konverzija solarne u električnu energiju preko fotovoltaičkih sistema je danas poznata tehnologija, mada je njena primjena oštro ograničena visokom cijenom i niskim efikasnostima. Ukupna efikasnost konverzije sunce-vodonik, uz elektrolizu vode, iznosi oko 15%, dok je za fotoelektrolitičke i fotobiološke procese znatno niža. I pored toga, interesantno je pomenuti da bi solarni paneli, postavljeni u pustinjском ekvatorijalnom području na površini od 300.000 km<sup>2</sup>, obezbjeđivali dovoljno električne energije da se, elektrolizom vode, proizvede vodonik potreban za pogon ukupnog transportnog sektora.

*Vodonik iz bioloških i biomimetičkih sistema.* Vodonik se iz biomase može dobiti, na konvencionalan način, parnom reformacijom, gasifikacijom uz pomjeranje reakcije ka vodoniku u višku vodene pare ili fermentacijom. Međutim, korišćenjem nekih vrsta algi može se proizvesti i direktnim biofotolitičkim razlaganjem vode. Takođe, kod nekih vrsta algi, u anaerobnim uslovima i pri smanjenom sadržaju sumpora, reakcija fotosinteze se završava stvaranjem vodonika umjesto kiseonika. Ispod zamrznutih tundri, kao i na nekim područjima na dnu okeana, nalaze se ogromne količine čvrstog

hidrata metana, nastalog organskim raspadom, koji se može iskoristiti za proizvodnju vodonika.

*Toplotna energija za proizvodnju vodonika.* Vodonik se može dobiti konvencionalnim pretvaranjem toplote u električnu energiju, a zatim elektrolizom vode, pri čemu se toplotna energija obezbjeđuje iz fosilnih goriva (najčešće), nuklearnih reaktora ili solarnih koncentratora. Međutim, postupak se može izvesti i direktnim termohemijskim razlaganjem vode, bez potrebe za električnom energijom. Temperatura razlaganja je iznad 500°C, i unutar je mogućnosti solarnih koncentratora, ali i iznad dometa nuklearnih reaktora sa lakom vodom.

Proizvodnja vodonika je, dakle, tehnološki izvodljiva, pri čemu su u fokusu postupci koji ne uključuju fosilna goriva, bilo kao sirovine bilo kao energetske izvore.

Sljedeći korak u okviru vodonične ekonomije je transport, skladištenje i distribucija. Jedna od glavnih prepreka na putu ka vodoničnoj budućnosti je nepostojanje infrastrukture, koja je odavno razvijena za elektricitet, naftu i prirodni gas. Ovo se može pokazati kao ozbiljan problem jer njena izgradnja zahtijeva ogromna ulaganja, na čemu uporno insistiraju protivnici vodoničnog koncepta. Danas se posebna pažnja usmjerava na izazove skladištenja vodonika, dobijenog iz različitih izvora i na različite načine. Efikasnim skladištenjem, zahvaljujući visokoj reverzibilnosti transformacije elektricitet – vodonik, otvaraju se mogućnosti i za skladištenje same električne energije.

U zavisnosti od toga da li se vodonik koristi za stacionarne namjene (rezidencijalni sektor, grijanje, klimatizacija, lokalna proizvodnja električne energije, industrija...) ili u transportu (laka vozila, kamioni, autobusi, avioni...), i sistemi za skladištenje su različiti. Kod transportnih potreba poželjno je da imaju malu masu i zapreminu, visoki sadržaj vodonika, funkcionalnost na ambijentalnim temperaturama i potrebnu brzinu snabdijevanja potrošača. Vodonik se može skladištiti u gasnom, tečnom ili čvrstom stanju.

*Gasno stanje.* Skladištenje u formi gasa je najstarija tehnologija. Rezervoari se izrađuju od lakih, savremenih materijala (karbon – fiber ojačani kompoziti). Nedostatak je mala količina vodonika koja se može smjestiti u prihvatljivu zapreminu. Energetska gustina, na uobičajenim pritiscima do 700 Bar, iznosi samo 4,4 MJ/l, u poređenju sa 31,6 MJ/l za benzin. Zbog malih dimenzija molekula i niskog viskoziteta, postoji opasnost od curenja i kroz mikronske naprsline, što uz visoku zapaljivost vodonika, čiji je plamen skoro nevidljiv, može predstavljati ozbiljan faktor rizika. Treba uzeti u obzir i veoma brzu disperziju isticulog gasa, što, donekle, umanjuje opasnost.

*Tečno stanje.* Skladištenje vodonika u tečnom stanju je mnogo prihvatljivije. Energetska gustina se povećava na 8,4 MJ/l. Međutim, sam postupak likvifikacije, zbog orto-para transformacije, visokih pritisaka i niskih temperatura ( $T_k = 20,28$  K), troši oko 1/3 energije uskladištenog vodonika. Tečni vodonik zahtijeva složenu tehnologiju skladištenja, uz upotrebu specijalno termički izolovanih kontejnera, kao i posebno rukovanje.

*Čvrsto stanje.* Najefikasiji i najperspektivniji način je skladištenje u čvrstom stanju. Ostvaruje se formiranjem hidrida sa metalima, drugim materijalima i nano strukturama. Gustina deponovanog vodonika je veća nego u tečnom stanju, a energetska

gustina značajno raste. Skladištenje može biti reverzibilno ili ireverzibilno. U prvom slučaju, povišenjem temperature, pri kontrolisanom pritisku, ubrzava se desorpcija, čime vodonik postaje raspoloživ za krajnju upotrebu. Adsorpcija (skladištenje) se odvija na povišenom pritisku i kontrolisanoj temperaturi. Oba procesa se odigravaju između 0 i 100°C i pritisku do 10 Bar, brzinama koje odgovaraju potrebama transporta. Kao najbolji materijali za skladištenje u čvrstom stanju pokazali su se metali i legure tipa AB, AB<sub>2</sub>, AB<sub>3</sub>, A<sub>2</sub>B... (TiFe, ZrMn<sub>2</sub>, LaNi<sub>5</sub>, Mg<sub>2</sub>Ni...), koje mogu sadržati između 1,4 i 3,6% masenih vodonika (u budućnosti i alanati – NaAlH<sub>4</sub> i adsorpcija u nano cijevima). Za dalja unapređenja potrebna su dodatna znanja u oblasti materijala i tehnologija skladištenja.

Jedna od najvećih prednosti vodonika, u odnosu na ostala goriva, je u raznovrsnosti njegove krajnje upotrebe:

- konvencionalno sagorijevanje u motorima sa unutrašnjim sagorijevanjem (uz minimalne modifikacije), mlaznim i raketnim motorima;
- direktna proizvodnja pare;
- sagorijevanje u gorivnim ćelijama.

Pažnja se danas fokusira na upotrebu vodonika u gorivnim ćelijama, u kojima se hemijska direktno konvertuje u električnu energiju. Ista transformacija se odigrava i u baterijama, ali su ova dva sistema, ipak, uveliko različita. Kod električnih baterija reaktanti su smješteni unutar sistema, dok se u gorivne ćelije dopremaju spolja, zbog čega se ove i ne mogu koristiti za skladištenje električne energije. Neefikasnost konvencionalnih tehnologija za proizvodnju električne energije, koje uključuju transformaciju hemijska-toplotna- mehanička-električna energija, najvećim dijelom se duguje termodinamičkim ograničenjima u transformacionom stupnju toplotna-mehanička energija. Gorivne ćelije sa direktnom konverzijom hemijska-električna energija nijesu podložne ovoj vrsti ograničenja, čime se znatno povećava energetska efikasnost (oko 60%). Međutim, ukupna efikasnost, koja obuhvata proizvodnju, transport, skladištenje i finalnu upotrebu vodonika u gorivnim ćelijama, značajno je niža. Ovo je, takođe, predmet posebne pažnje protivnika koncepta vodonične ekonomije.

Vrste gorivnih ćelija su brojne, a ovdje su navedene najčešće korišćene, kao i one za koje se smatra da imaju perspektivu u budućnosti:

Naziv	Gorivo	Temper. opseg °C	Reakcija
1. Direktna metanolska gorivna ćelija (DMFC)	metanol	50	$\text{CH}_3\text{OH} + 1,5\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
2. Direktna etanolska gorivna ćelija (DEFC)	etanol	50–80	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$
3. Proton izmjenljiva membrana gorivna ćelija (PEMFC)	vodonik	75–150	$\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$
4. Alkalna gorivna ćelija (AFC)	vodonik	50–70	$\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$
5. Fosforna kisjelina gorivna ćelija (PAFC)	reformisani ugljovodoni	175–220	$\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$

Naziv	Gorivo	Temper. opseg °C	Reakcija
6. Rastopljeni karbonat gorivna ćelija (MCFC)	reformisani ugljovodonici	> 500	$H_2 + 0,5O_2 = H_2O$
7. Čvrsti oksidi gorivna ćelija (SOFC)	reformisani ugljovodonici	550–1100	$H_2 + 0,5O_2 = H_2O$

Kod svih ćelija katodni reaktant je kiseonik iz vazduha. Osim za DMFC i DEFC, kod kojih metanol, odnosno etanol, direktno reaguju na anodi, gorivo (anodni reaktant) je vodonik, ranije dobijen ili proizveden reformacijom ugljovodonika na licu mjesta. Po konvenciji, gorivne ćelije imaju nazive po vrsti elektrolita ukoliko je gorivo vodonik, odnosno po vrsti goriva ukoliko nije. Reakcioni produkti su voda i toplota, osim kod DMFC i DEFC, gdje se izdvaja i  $CO_2$ . Visokotemperaturne ćelije se koriste u stacionarne svrhe.

Gorivne ćelije imaju niz prednosti u odnosu na konvencionalne konvertorske sisteme, ali i određene nedostatke:

*Prednosti:*

- Visoka efikasnost
- Visoka gustina energije
- Mogućnost korišćenja različitih goriva
- Rade bez buke (nema mehaničkih djelova), niska do nulta emisija

*Nedostaci:*

- Cijena
- Pouzdanost
- Infrastruktura
- Cijena razvoja

Elektroliti koji se koriste u ovim sistemima su raznovrsni: polimeri, oksidi, tečnosti koje sadrže provodne jone ( $H^+$ ,  $O_2^-$ ,  $OH^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ). Smješteni su između različitih tipova elektroda i sprečavaju miješanje goriva i oksidansa. PEM gorivna ćelija je prikazana na Slici 1. 6.

Osnovna prepreka efikasnom funkcionisanju niskotemperaturnih ćelija je izražena sprost katodne reakcije (redukcija kiseonika). Razmjena četiri elektrona po molekulu, uz učešće isto toliko protona u reakciji, čini je složenom i sporom, istovremeno otežavajući kinetička istraživanja sa određivanjem mehanizma procesa. Ovi problemi se pokušavaju prevazići upotrebom novih, efikasnih elektrokatalizatora, od kojih su, danas, najbolji nano klasteri plemenitih metala (obično platina). I pored toga što se ovi metali koriste u nano formi, dakle u veoma malim količinama, značajno utiču na cijenu sistema. Očigledno je da se moraju tražiti jeftinija rješenja, što i jeste u istraživačkom fokusu. Visokotemperaturni sistemi (MCFC, SOFC), međutim, nemaju problema sa katodnom reakcijom, pa je moguće koristiti znatno jeftinije elektrodne materijale. Osim na dizajniranju novih elektrokatalizatora, radi se i na osvajanju efikasnih membranskih materijala, elektrolita i sklopova gorivnih ćelija.

Gorivne ćelije se mogu koristiti za različite namjene: stacionarne potrebe (udaljena i lokalizovana područja bez mogućnosti snabdijevanja električnom energijom, podrška elektrosistemu...), portabl uređaji (laptopovi, kompjuteri, telefoni...), ali je

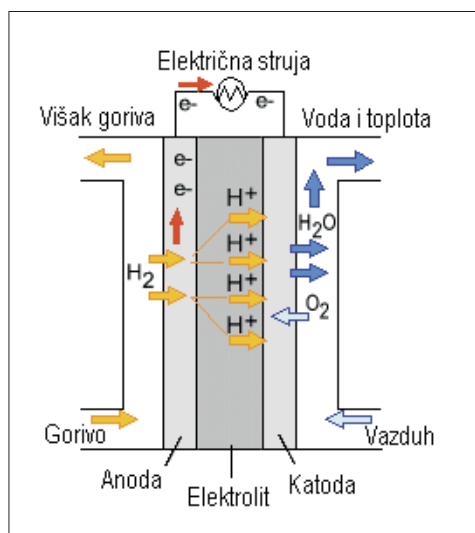
pažnja, ipak, koncentrisana na upotrebu u transportnom sektoru, koji danas troši više od polovine ukupne nafte i emituje 25% CO<sub>2</sub> povezanog sa energijom.

Sada treba odgovoriti na pitanje zašto, i pored niza prednosti, gorivne ćelije još nijesu u širokoj primjeni. Pored infrastrukturnih problema, vezanih za vodonični transport, distribuciju i skladištenje, glavne prepreke su:

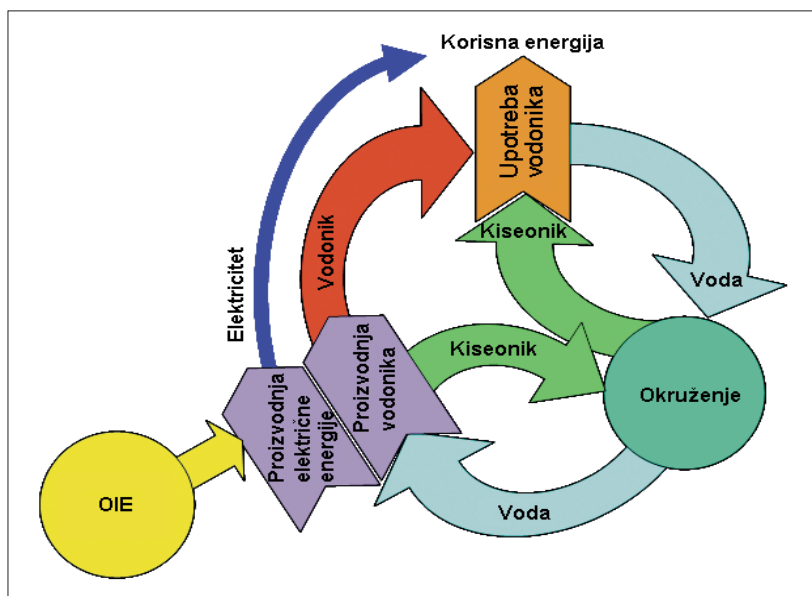
- vodonik iz prirodnog gasa je jeftiniji od benzina, ali je još jeftiniji sam prirodni gas, koji je, takođe, gorivo;
- samo vodonik iz obnovljivih izvora smanjuje zavisnost od fosilnih goriva (nafta) i emisiju CO<sub>2</sub>, ali je veoma skup;
- skladištenje vodonika je još neriješeno i zahtijeva velike prostore;
- gorivne ćelije su skupe (3000 USD/KW);
- radni vijek je kratak.

Ipak, na duži rok (sljedećih nekoliko decenija), vodonična ekonomija može predstavljati rješenje globalnog problema energije i klimatskih promjena (Slika 1. 7).

Razlozi za optimizam su više nego očigledni:



Slika 1. 6. PEM gorivna ćelija



Slika 1. 7. Održivi energetski sistem (F. Barbir)

- neminovan je prelazak, u globalnom energetsom snabdijevanju, sa neodrživog sistema, zasnovanog na fosilnim gorivima, na nove održive sisteme;
- obnovljivi izvori energije se mogu pokazati kao održivi sistemi;
- obnovljivi izvori zahtijevaju energetska nosač (vodonik, elektricitet);
- elektricitet se može skladištiti u formi vodonika i time riješiti problem promjenljivih intenziteta;
- vodonik je efikasno gorivo za transport;
- vodonik je čisto i obnovljivo gorivo;
- gorivo kada se ne može koristiti električna energija.

## 1. 7. SISTEMI ZA SKLADIŠTENJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

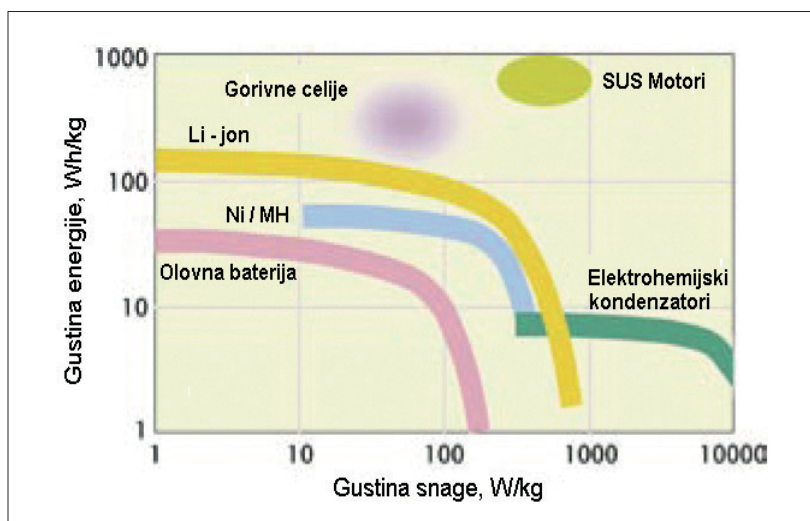
Povećanje udjela obnovljivih izvora u cilju smanjenja zavisnosti od fosilnih goriva i redukcije emisije gasova staklene bašte (posebno CO<sub>2</sub>), postavlja se kao globalni izazov.

Za proizvodnju čiste električne energije poseban doprinos se, u budućnosti, očekuje od energije sunca i vjetra, čiji je potencijal ogroman, ali danas praktično neiskorišćen. Međutim, zbog svoje nestalnosti i promjenljivog intenziteta, ovi primarni izvori ne mogu biti korišćeni 24 sata dnevno, iako su potrebe za električnom energijom neprekidne. Prestanak ili smanjenje brzine vjetra kod vjetrogeneratora, kao i smjena dana i noći ili porast dnevne oblačnosti kod solarnih pretvarača, izazivaju potpuni prekid ili redukovanu proizvodnju. Fluktuacije, čak i vrlo kratkotrajne, pogotovo ako se koriste izvori veće snage, mogu imati ozbiljne posljedice po stabilnost elektrosistema i sigurnost snabdijevanja električnom energijom, kao što mogu uzrokovati i velike štete u samom sistemu. Očigledno je da je masovnije uvođenje ovih primarnih, obnovljivih izvora uslovljeno razvojem novih, efikasnih sistema za skladištenje električne energije, uz čiju bi se pomoć premostili periodi zastoja ili smanjenih intenziteta, a u kojima bi se energija akumulirala tokom stvaranja viškova. Unaprijeđeni sistemi za skladištenje biće, takođe, potrebni da bi se napravio progres od hibridnih, preko plug-in hibridnih do sveelektričnih vozila.

Danas je poznato da se električna energija ne može skladištiti na efikasan način, tako da njena proizvodnja, u svakom trenutku, mora biti uravnotežena sa potrošnjom. U slučaju neplaniranih oscilacija i ispada (što se rjeđe dešava), reaguje se angažovanjem rezervne snage ili oslanjanjem na susjedne sisteme. U veoma maloj mjeri koriste se i sistemi za skladištenje viškova energije, ali sa niskom efikasnošću. Jedan od načina za skladištenje kroz druge energetske forme sastoji se u pumpanju vode, koja je već iskorišćena za proizvodnju električne energije, na više kote. Tokom perioda viškova električnu energiju je, takođe, moguće skladištiti i komprimovanjem vazduha, obično u podzemne, prirodne rezervoare ili sabijanjem opruga. Pored neefikasnosti, ovi postupci su često vezani i za specifične lokacije i ne mogu predstavljati prihvatljivo rješenje za budućnost. Treba ponoviti, van konteksta ovoga poglavlja, da se električna energija može efikasno skladištiti u formi vodonika.

Danas postoji puna saglasnost da rješenje problema treba tražiti kroz razvoj novih generacija električnih baterija i elektrohemijskih (super, ultra) kondenzatora. Oba sistema su već u upotrebi, ali zbog nezadovoljavajućih performansi samo u manjim





Slika 1. 8. Gustine energije vs. gustine snage za baterije i elektrohemijske kondenzatore

uređajima ili kao starteri u vozilima. Bitna razlika između njih je u formi uskladištene električne energije, iako se oba sistema baziraju na elektrohemijskim fenomenima. Dok se u baterijama skladištenje obavlja u formi hemijske energije, u elektrohemijskim kondenzatorima električna energija ostaje u obliku elektriciteta. Današnje baterije, u odnosu na superkondenzatore, imaju znatno veću gustinu energije, ali i izraženo manju gustinu snage (Slika 1. 8). Oba sistema pokazuju nedovoljne kapacitete za potrebe u budućnosti. Naučni i tehnološki razvoj je, prvenstveno, usmjeren na unapređenje elektrodnih materijala, elektrolita, membrana i sklopova.

### 1. 7. 1. BATERIJE

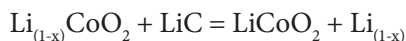
Dizajn i koncept današnjih baterija nije suštinski promijenjen od njihovog pronalaska (Voltin stub – 1800. godina). Da bi odgovorile zahtjevima budućnosti, kapacitet baterija mora biti dramatično uvećan (10 X), što će tražiti nova fundamentalna znanja i efikasne tehnologije i materijale.

Baterije (elektrohemijski izvori struje) se dijele na dvije glavne grupe: one koje se ne mogu (primarne) i one koje se mogu ponovo puniti (sekundarne). Za podršku energetskej sistemu i potrebe transporta od značaja su samo sekundarne. U okviru ove grupe, hronološkim redom su navedeni važniji tipovi:

- Olovna baterija;
- Ni-Cd baterija;
- Ni- metal hidrid baterija;
- Zn (Al, Li)- vazduh baterija;
- Visokotemperaturna ZEBRA baterija;
- Li-jon i Li-polimer baterija.

Za unapređenje performansi konvencionalnih, ali i novijih generacija baterija, neophodna su poboljšanja elektrodnih materijala (uglavnom nano materijali), elektrolita i membrana, čime bi se, kroz porast ćelijskog napona i količine uskladištenog elektriciteta, uvećao kapacitet. Reakcije na elektrodama i prenos mase u sistemu se moraju značajno ubrzati, a fazne promjene, do kojih dolazi u konvencionalnim sistemima, ili bitno ubrzati ili redukovati. Punjenje treba da je kratkotrajno, radni vijek baterija znatno duži, broj ciklusa punjenje-pražnjenje veći, samopražnjenje suzbijeno a radni temperaturni opseg priširen.

Olovne i Ni-Cd baterije su klasični sistemi u širokoj upotrebi. Zbog štetnosti kadmijuma po ljudsko zdravlje, sve više ih zamjenjuju Ni-metal hidrid baterije, koje pripadaju srednjoj generaciji. Li-jon i Li-polimer sistemi su rezultat novijih prodora i vremena i poznati su pod nazivom „rocking chair”. Obje elektrode sadrže interkalarne materijale, sa strukturom u koju „gostujuća” čestica biva umetnuta ili iz nje uklonjena, uz veoma male strukturne promjene, zbog čega su reakcije na elektrodama veoma brze. Napon na ćeliji, uz upotrebu organskih rastvarača (LiPF<sub>6</sub> u propilen karbonatu), premašuje vrijednost od 3,7 V, a broj ciklusa dramatično raste. Primjer reakcije uz korišćenje LiCoO<sub>2</sub> kao katode, sa pražnjenjem slijeva udesno,



Namjena ovih baterija je prvenstveno za transportni sektor, mada se efikasno koriste i u malim, prenosivim uređajima. Ovim se otvara mogućnost za šire korišćenje plug-in hibridnih i sveelektričnih vozila. Neki komercijalni tipovi automobila sa pogonom preko Li – polimer baterija su već u upotrebi (Tesla roadster), mada je cijena za sada veoma visoka.

Danas su od vozila na djelimični ili potpuni električni pogon najzastupljenija hibridna. Punjenje baterija se obavlja tokom vožnje kroz tzv. regenerativno kočenje. Kod plug-in hibridnih i sveelektričnih vozila baterije se pune sa mreže, kada vozilo nije u upotrebi. Glavni nedostatak vozila na potpuni električni pogon je mala brzina, ograničeni domet i dugo vrijeme punjenja, tako da se prevashodno koriste za lokalne potrebe.

Rasprava o prednostima i nedostacima vodoničnog (gorivne ćelije) ili električnog (baterije) koncepta u transportu i dalje traje. Međutim, treba imati u vidu opšte opredjeljenje da i tehnologije dobijanja i finalne upotrebe energije treba, što je moguće više, diverzifikovati.

## 1. 7. 2. ELEKTROHEMIJSKI KONDENZATORI

Skladištenje električne energije u električnim kondenzatorima je odavno poznat i široko korišćen postupak. Međutim, klasični sistemi, sastavljeni od paralelnih ploča (ugljenični materijali, aluminijum) odvojenih dielektrikom, zbog veoma niske gustine energije, ne mogu odgovoriti čak ni današnjim specifičnim potrebama. U novije vrijeme, naime, naglo rastu zahtjevi za značajnim količinama energije u pulsnoj formi. Baterije, takođe, ne mogu biti upotrijebljene u ove svrhe jer je, zbog sporosti procesa (hemijski i fizički), gustina snage veoma niska. Moguće rješenje predstavljaju elektrohemijski kondenzatori.

Razvojni put kondenzatora se može prikazati hronološkim nizom:

- konvencionalni kondenzatori;
- elektrolitički kondenzatori;
- elektrohemijski kondenzatori.

Elektrolitički kondenzatori predstavljaju napredak u odnosu na klasične jer su, smanjenjem međuelektrodnog rastojanja, sa milimetarskog na mikrometarski red, uvećani kapaciteti ( $C-A/4 d$ ), mada ne dramatično.

Elektrohemijski kondenzatori posjeduju sve što i konvencionalni, ali raspolažu znatno višom gustinom energije. Svrstavaju se u tri grupe:

- elektrohemijski dvojnoslorni kondenzatori (EDLC);
- pseudokondenzatori (PC),
- kombinovani.

EDLC, pored više energetske gustine, pokazuju i niz drugih prednosti:

- brzo punjenje (sekundni red);
- pouzdanost;
- veliki broj ciklusa punjenje–pražnjenje (stotine hiljada);
- široki temperaturni opseg.

Veoma su pogodni zbog visoke gustine snage za skladištenje energije iz različitih kratkotrajnih procesa (kočenje u vozilima, spuštanje liftova...), kada su baterije potpuno neefikasne ili pak kao podrška baterijama. Električnu energiju skladište fizički, u formi elektriciteta, bez hemijskih i faznih promjena. Procesi se odigravaju praktično reverzibilno, čime se objašnjava izuzetno veliki broj ciklusa. Naelektrisanje je smješteno na granicama elektrohemijskog dvojnog sloja, koji se formira na kontaktu elektroda-elektrolit, a čija je debljina nanometarskog reda. Elektrode se izrađuju, uglavnom, od karbonskih materijala visoke specifične površine (do  $2500 \text{ m}^2/\text{g}$ ). Elektroliti se rastvaraju u organskim (aprotičnim) rastvaračima sa visokim naponom razlaganja. Pune se iz primarnih ili sekundarnih izvora struje, zadržavajući postignutu strukturu dvojnog sloja i nakon prekida. Dakle, zahvaljujući veoma malim rastojanjima preko interfejsa elektroda-elektrolit, visokim specifičnim površinama, velikim vrijednostima dielektrične konstante i visokom naponu razlaganja rastvarača, specifični kapaciteti dostižu i do  $200 \text{ F/g}$ , uz broj ciklusa punjenje–pražnjenje iznad  $10^6$ .

*Pseudokondenzatori.* Dok se u EDLC, tokom punjenja i pražnjenja, odigravaju samo fizički procesi, što i jeste opšta karakteristika kondenzatora, postoje sistemi koji se ponašaju na isti način, iako u njima teku i faradejski (hemijski) procesi. Moguće je odigravanje tri vrste procesa: površinska adsorpcija reakcionog produkta ili intermedijara, redoks reakcije u kojima učestvuju joni i dopiranje ili dedopiranje aktivnog provodnog polimera na elektrodu. Prva dva su površinski i, stoga, visokozavisni od stanja i veličine površine elektrode, dok je kod trećeg, koji se odigrava po masi, ova zavisnost slabije izražena. Ustanovljeno je da u ovim sistemima postoji linearna veza između potencijala elektrode i količine naelektrisanja razmijenjenog tokom faradejskog procesa, kao i strujni pad na nultu vrijednost nakon dostizanja stacionarnog stanja, što jesu fundamentalne osobine kondenzatora. Ovakva pojava je poznata pod nazivom pseudokapacitivnost, a uređaji kao pseudokondenzatori. Specifični kapacitet, u ovom slučaju, doseže do vrijednosti od  $750 \text{ F/g}$ .

Kombinovanjem EDLC i pseudokondenzatora mogu se dostići još veće efikasnosti.

## 1. 8. ELEKTROHEMIJSKA INDUSTRIJA U CRNOJ GORI I PROCJENA ENERGETSKIH POTREBA

Elektrohemijske proizvodnje su intenzivno zastupljene u svijetu sa tendencijom dalje kvantitativne i kvalitativne ekspanzije. U principu, ove tehnologije su ekonomičnije, kontrolabilnije i ekološki prihvatljivije od odgovarajućih konvencionalnih, sa perspektivom da ih vremenom supstituišu. Danas se u elektrohemijskoj industriji proizvode: metali (ili rafinišu) i legure (Al, Zn, Cu, Cd, zemno alkalni metali...), neorganski materijali ( $H_2$ ,  $Cl_2$ , NaOH,  $NaClO_3$ ,  $NaClO_4$ ,  $H_2O_2$ ...), organski materijali, senzori, baterije, elektrohemijski kondenzatori, gorivne ćelije, oblikuju metali i legure, tretiraju otpadne industrijske i komunalne vode, nanose zaštitni i dekorativni metalni i nemetalni slojevi, itd. Elektroanalitička hemija, spektroelektrohemijska i fotoelektrohemijska dobijaju istaknuto mjesto u modernom tehnološkom svijetu.

U Crnoj Gori jedina elektrohemijska industrija je KAP. Proizvodnja aluminijuma se obavlja preradom boksita (ruda aluminijuma) do glinice ( $Al_2O_3$ ), koja se, zatim, elektrolitički razlaže u kriolitnom rastopu, do katodnog aluminijuma i sporednih anodnih produkata. Početni kapacitet fabrike (1972. god.) je bio 50.000 tAl/g, da bi izgradnjom druge faze elektrolize (1979. god.) bio udvostručen. Posljednjih godina, podizanjem strujnog intenziteta (80 na 89 KA), proizvodnja je povećana na 120.000 tAl/g. Globalna ekonomska kriza, praćena vrtoglavim padom cijena aluminijuma na berzi, rezultirala je prepolovljenom proizvodnjom – 60.000 tAl/g. Fabrika za proizvodnju glinice je stavljena van funkcije, zbog visoke cijene boksita (Rudnik boksita – Nikšić) i naraslih troškova prerade. Fabrika za preradu aluminijuma, Fabrika aluminijumskih užadi i Fabrika Al – felgi odavno ne rade. Kovačnica i Silumini su, takođe, van pogona. Danas u KAP-u rade Elektroliza, Livnica i Fabrika anoda, sa po oko 50% kapaciteta.

Industrija aluminijuma je jedan od najvećih potrošača električne energije u svijetu. Potrošnja drugih energenata i sirovina (većina karbonskog porijekla) je, takođe, značajna, kao i količina emitovanih gasova (uglavnom GSB).

Podaci koji slijede odnose se na puni radni kapacitet KAP-a (120.000 tAl/g):

No.	Sirovine / energenti	Jed. mjere	Potrošnja / g
1.	boksit	t	562.000
2.	mazut	t	94.500
3.	lož ulje	t	59.850
4.	soda (100% NaOH)	t	30.250
5.	petrol koks	t	47.000
6.	elektrodne smole	t	10.600
7.	katodni materijali	t	1.350
8.	fluorne soli	t	3.650
9.	voda	m <sup>3</sup>	19.850.000
10.	električna energija	MWh	1.887.400

Pitanje perspektive KAP-a je otvoreno i zavisi od niza faktora: kretanja cijene aluminijuma na berzi, cijene i raspoloživosti električne energije i drugih energenata i sirovina, spremnosti države da nastavi sa subvencionisanjem troškova, broja zaposle-

nih, budućeg uticaja na životnu sredinu, strategije energetske i tehnološkog razvoja Crne Gore, planova i mogućnosti većinskog vlasnika, itd.

U ukupnoj bruto potrošnji električne energije u Crnoj Gori KAP učestvuje sa oko 44% (120.000 tAl/g), pri čemu su se potrebe obezbjeđivale iz domaćih izvora i uvoza. Redukcijom proizvodnje (60.000 tAl/g), ove potrebe su prepolovljene (pad je još veći kod drugih energenata), čime je pritisak na energetske sektor značajno relaksiran. Eventualnim gašenjem KAP-a, što jeste jedna od opcija, Crna Gora bi raspolagala dovoljnim količinama električne energije iz domaćih izvora za podmirenje svojih potreba i razvoja u kraćem roku.

Opredjeljenje za proizvodnju aluminijuma, kao i, u velikoj mjeri, odustanak od ekspanzije sekundarnog sektora (prerada), učinilo je da Crna Gora postane veoma energetske intenzivna ekonomija. Treba napomenuti da je do početka 90-ih, u KAP-u, prerađivano oko 35.000 tAl/g, uz potrošnju od 5% od ukupne električne energije. U 21. vijeku, kada se postavlja globalni zadatak za prelazak sa ekonomskog na održivi razvoj, ovakva orijentacija ne može biti dugoročna.

Ekološki aspekti su, takođe, otvoreni za naredno vrijeme. Uključujući sanaciju do sada učinjenih šteta, potrebne su velike investicije, čija se opravdanost, imajući u vidu neizvjesnu sudbinu KAP-a na duži rok, može dovesti u pitanje. Istina, u toku su radovi na zatvaranju elektrolitičkih ćelija, što će omogućiti kaptiranje gasova i uklanjanje fluornih jedinjenja ( $CF_4$ ,  $C_2F_6$ ), koja pripadaju grupi GSB.

Ekonomičnost poslovanja u aluminijskoj industriji, ipak, prvenstveno određuju cijena i raspoloživost električne energije. U Evropi se broj proizvođača zbog toga smanjuje uz, eventualno, preseljenje u područja sa energetskim viškovima i nižom cijenom. U izgledu nema velikih tehnoloških unapređenja, ali je u fokusu povećanje efikasnosti proizvodnje.

S druge strane, potrebe za aluminijumom će i u budućnosti rasti (avio-industrija, automobili, građevinarstvo...). Cijena na berzi, koja poslije velikog pada ponovo raste, i dalje će varirati. Odavno je poznato da u ovoj industriji cjenovni pikovi pokrivaju padove i da se promišljenom ekonomijom može obezbijediti stabilno poslovanje i razvoj. Svakako, jedan od glavnih amortizera cjenovnih fluktuacija primarnog aluminijuma jeste njegova sveobuhvatna prerada.

U Crnoj Gori, uz mješovita ulaganja (javni, privatni sektor, inostrani kapital, međunarodni razvojni fondovi...) i uvoz naprednih tehnologija, mogao bi se popuniti prostor koji ne zahtijeva visoku energetske intenzivnost niti ugrožava životnu sredinu. U elektrohemijskoj oblasti moguće se, u budućnosti, orijentisati na proizvodnju novih generacija baterija, gorivnih ćelija, senzora kao i na valorizaciju morske soli do vrijednih hlornih jedinjenja (hlorati, različiti perhlorati). Takođe je ostvariv razvoj manjih proizvodnih kapaciteta, npr. galvanotehnički pogoni (nekada uspješna proizvodnja u Mojkovcu), uz poštovanje oštrog mjera za zaštitu životne sredine. Uopšte, razvoj novih tehnologija u ovoj oblasti je brz i u skladu sa potrebama i zahtjevima budućnosti, otvarajući mogućnost i za uključivanje Crne Gore.

Pored energetske, tehnološke i problema vezanih za zaštitu okruženja, moguće je da se u Crnoj Gori javi i nedostatak osposobljene domaće pameti (tehničari, inženjeri, istraživači), jer proizvodne oblasti brzo gube trku sa sektorom usluga.

## 1. 9. CRNA GORA U XXI VIJEKU

Svoju današnju poziciju i iz nje izvedenu perspektivu u energetsom sektoru, industriji i transportu, Crna Gora, kao i većina drugih zemalja, najbolje može opisati tzv. Business as usual (Baseline) scenariom. Spore promjene, oslonjenost na konvencionalne, energetske intenzivne i prljave tehnologije, visoka zavisnost od uvoznih energenata (uglavnom karbonskog porijekla), sirovina i domaćeg uglja, neracionalna potrošnja energije kao i nedostatak strategije tehnološkog razvoja, ne pružaju, u navedenom smislu, viziju uspješne i sigurne budućnosti. Međutim, opredjeljenje za realizaciju ciljeva koje postavlja BLUE, ili što je vjerovatnije ACT scenario, otvorilo bi nove horizonte i prilike za priključenje globalnim procesima u budućnosti.

Crna Gora energetske počiva na proizvodnji električne energije iz domaćeg uglja i hidropotencijala, kao i, u manjoj mjeri, na neefikasnom korišćenju biomase. Resursi u ovim oblastima su znatni, ali i nedovoljno iskorišćeni. Svi ostali energenti se, u potpunosti, uvoze, dok unutrašnja infrastruktura i magistralne veze za prirodni gas uopšte ne postoje. Industrija aluminijuma i čelika, koja predstavlja kičmu domaće industrijske proizvodnje, energetske je neefikasna, prljava i dijelom tehnološki zastarjela. U drumskom transportnom sektoru, koji je u brzom ekspanziji, prevladavaju starija, niskoefikasna vozila uz korišćenje konvencionalnih goriva lošeg kvaliteta. Grijanje prostora u komercijalnom i rezidencijalnom sektoru je, u većem dijelu Crne Gore, zasnovano na električnoj energiji (minimalna zastupljenost toplotnih pumpi).

Posljedice globalnog ekonomskog rasta, dobrim dijelom oslonjenog na energiju iz fosilnih goriva, već se, kroz klimatske promjene, osjećaju u Crnoj Gori i regionu. Neki sektori od vitalnog značaja, a posebno turizam i poljoprivreda, postaju veoma ugroženi. Posljedice koje trpi, uz očekivana pogoršanja tokom narednih godina, uveliko prevazilaze sam doprinos Crne Gore.

Strategijom energetske razvoja Crne Gore do 2025. godine planirana je: redukcija emisije GSB za 20% (makar kroz podršku cilju postavljenom u EU), povećanje energetske efikasnosti uz smanjenje potrošnje energije od 20%, povećanje udjela OIE na 20% od ukupne potrošnje primarne energije, kao i povećanje učešća biodizela u gorivima na 10%.

U oblasti proizvodnje električne energije planira se, do 2025. godine izgradnja: druge termoelektrane u Pljevljima (uz toplifikaciju grada), kaskadnih elektrana na Morači i elektrane na Komarnici, više mini-elektrana na manjim vodotocima, farmi vjetrogeneratora, kao i elektrane na otpad. Ukupna godišnja proizvodnja iz navedenih izvora se procjenjuje na 2,2–2,3 TWh (sadašnja 2,9 TWh).

Termoelektrana na ugalj iz Maočkog basena, uz postojeću u Pljevljima, predstavlja bi značajan doprinos sigurnosti energetske sistema i valorizaciji domaćih resursa. Primjenom novijih tehnologija (kombinovani gasno-parni sistemi sa ili bez gasifikacije, sagorijevanje uglja u fluidizovanom sloju, kombinovana proizvodnja električne i toplotne energije) efikasnost bi mogla biti podignuta sa sadašnjih 30% na 45%, uz smanjeni uticaj na okruženje. Ipak, treba istaći da je riječ o neobnovljivom i, za veće instalisane snage, ograničenom resursu. Puna valorizacija uglja, kroz proizvodnju električne energije u dvije elektrane, snage po 225 MW, uvećala bi emisiju GSB (i drugih



gasova) barem dva puta (iznad 3 miliona tona CO<sub>2</sub>). Postupak izdvajanja i sekvenciranja CO<sub>2</sub> se ne razmatra. Pored nepostojanja odgovarajućih geoformacija, treba istaći da se, nakon izgradnje druge elektrane, ne planiraju nove, pa ni, iz ovih razloga, dodatni rast emisije u budućnosti. U ovom kontekstu treba primijetiti da ostaje nejasan način ostvarenja cilja o redukciji emisije GSB. Eventualna izgradnja cementare u Pljevljima bi značajno pogoršala ukupnu situaciju.

Hidropotencijal je u Crnoj Gori bez Tare i prevođenja njenog dijela u Moraču, iskorišćen sa 28%. Planiranom gradnjom iskorišćenost bi dostigla 43%. Iako je riječ o obnovljivoj energiji, u Crnoj Gori su, kao i u svijetu, podijeljena mišljenja o gradnji elektrana sa tzv. visokim branama. Postoje i stavovi da ove izvore, sa instalisanom snagom iznad 10 MW, čak ne treba svrstavati u obnovljive, zbog ireverzibilnih pomerača u okruženju. Mini-elektrane bi mogle godišnje proizvesti 300–400 GWh, dok se potencijal energije vjetra procjenjuje na oko 100 GWh. U posljednje vrijeme se, međutim, govori o gradnji vjetrogeneratora na Krnovu, sa instalisanom snagom od 200 MW. Nije sasvim jasno kako se misli riješiti problem promjenljivih intenziteta, pri ovako značajnoj snazi izvora.

Solarna energija predstavlja veliki potencijal, imajući u vidu broj sunčanih dana (2000–2500 sati godišnje). Prvenstveno će biti korišćena za grijanje, pripremu tople vode i druge niskotemperaturne procese. Fotonaponski pretvarači su danas veoma skupi i sa niskom efikasnošću, pa se, na ovom stepenu razvoja, ne mogu preporučiti za masovniju upotrebu u Crnoj Gori. Međutim, očekivani napredak ove tehnologije, tokom narednih decenija, mogao bi bitno promijeniti prethodni stav.

Biomasa je, takođe, značajan crnogorski energetske potencijal. Godišnji prirast pri sadašnjoj eksploataciji (–1 m<sup>3</sup>/ha/god) procjenjuje se na 1.000.000 m<sup>3</sup>. Dio će se i dalje koristiti na konvencionalan način (kuvanje i grijanje), dok bi drugi mogao biti upotrijebljen za proizvodnju električne energije ili konverziju do biogoriva. Zbog ograničenosti obradivih površina i ukupno malih efekata ne može se preporučiti proizvodnja prve generacije biogoriva. Osvajanjem tehnologija konverzije celuloznih materijala (druga generacija biogoriva), kao što su šumski, poljoprivredni i otpad iz drvne industrije, otvorio bi se novi prostor i za domaću proizvodnju. U međuvremenu, bioetanol i biodizel iz uvoza mogu djelimično supstituisati konvencionalna i otvoriti put ka obnovljivim i čistim gorivima u sektoru transporta.

Dio potrebne energije (električna i/ili toplotna, goriva za transport) može se dobiti valorizacijom otpada, odnosno njegovim spaljivanjem, proizvodnjom biogasa ili ulja sličnih nafti (depolimerizacija). Iako je, u slučaju proizvodnje električne energije, riječ o izvorima manje snage, trebalo bi ih planirati uz buduće regionalne deponije.

Prethodno su navedeni i kratko komentarisani neki pravci, sadržani u Strategiji energetske razvoja Crne Gore do 2025. godine. Radi se o uglavnom realnim i izvodljivim planovima, zasnovanim na postojećim domaćim resursima i konvencionalnim tehnologijama. Međutim, i pored djelimičnih unapređenja (toplifikacija uz gašenje manjih kotlarnica, uvođenje TNG kao prethodnice prirodnom gasu, povećanje udjela hidro, solarne i energije vjetra, podizanje energetske efikasnosti i učešća biogoriva), koja vode poboljšanju u sektoru energije i ublažavanju emisija GSB, Crna Gora ostaje udaljena od koncepta čiste i obnovljive energije (BLUE) i tek malo unutar ACT scenarija.

Kao potpisnik više međunarodnih sporazuma, konvencija i protokola u oblasti zaštite životne sredine i, posebno, borbe protiv klimatskih promjena kroz adaptaciju (pasivno) i mitigaciju (aktivno), Crna Gora je preuzela određene obaveze, iako bez direktnih ograničenja na planu redukcije emisije GSB, barem do 2012. godine (Okvirna konvencija UN o promjeni klime, Kyoto protokol uz Okvirnu konvenciju...). Na predstojećem samitu u Kopenhagenu, ukoliko dodje do saglasnosti razvijenih i zemalja u brzom razvoju (Kina, Indija...), može se očekivati inoviranje i produženje važenja Kyoto protokola (ističe 2012. godine). Ostvarenje cilja da prosječna temperatura na Zemlji ne poraste za više od 2°C do 2050. godine, a u odnosu na predindustrijsko doba, postaviće pred sve učesnike veoma oštre zahtjeve. Moglo bi se reći da se, u ovom periodu, teži realizaciji tzv. BLUE scenarija. Kako je već rečeno u prethodnim poglavljima, dostizanje ovog cilja zahtijeva revolucionarne promjene u svim oblastima života, uz ogromna ulaganja u nove tehnologije, prvenstveno u energetskom, industrijskom i transportnom sektoru. Mjere koje predviđa ACT scenario neće biti dovoljne, dok je realnost provođenja BLUE scenarija, nažalost, neizvjesna.

Period do implementacije novih tehnologija, koje bi obezbijedile dekarbonizaciju goriva i procesa ili uspostavljanje ravnoteže CO<sub>2</sub> ciklusa (unaprijeđeni fotonaponski pretvarači, nove generacije nuklearnih reaktora, sistemi za skladištenje električne energije, oponašanje bioloških procesa sa visokom efikasnošću, vodonična ekonomija, druga i treća generacija biogoriva, sekvestracija CO<sub>2</sub>, visoka energetska efikasnost, nove elektromreže, solid – state osvjtljenje...) biće dug i, ponegdje, sa neizvjesnim ishodom. Do tada ostaje rad na postepenom unapređenju tehnologija i stvaranju jedinstvenog fronta za adaptaciju na izmijenjene okolnosti i ublažavanje emisija GSB.

Uloga Crne Gore u kreiranju nastalih problema, kao i njen kapacitet da doprinese njihovom rješavanju, veoma je mala. Međutim, za globalnu borbu protiv klimatskih promjena neophodno je učešće svih (vlade, druge institucije, naučni i tehnološki centri, finansijski sektor pa do svakog pojedinca), uključujući i Crnu Goru, uz dosljedno poštovanje obaveza i ispoljavanje sopstvene inicijative. Ovakav koncept predviđa spremnost i obavezu razvijenih zemalja za pomoć siromašnima i najranjivijima, stvaranje moćnih finansijskih fondova dostupnih svima, transfer znanja i tehnologija, pomoć u obrazovanju itd., EU, UN (UNEP, UNDP, Program Global Green New Deal) takođe rade na podizanju svijesti o neophodnosti brzog djelovanja i organizovanju učesnika na globalnom ili regionalnom planu (zemlje Jugoistočne Evrope, mediteranske zemlje...). Jedan od efikasnih načina za uključenje u pokret za redukciju emisije CO<sub>2</sub> predstavlja uvođenje tzv. „Carbon trading-a”. Naime, postavljanjem ograničenja na emisije pojedinačnim operaterima, a kroz njih nacionalnim teritorijama, određuje se dozvoljeni maksimum. Njegov okvir mora biti ispod nivoa koji predviđa Business As Usual scenario. Ključni dio ukupnog projekta je u dozvoljenoj trgovini kvotama CO<sub>2</sub>. Kupac je onaj koji više zagadjuje, a prodavac onaj koji emituje manje od dozvoljenog. Dakle, zagađivač plaća, čime se obojica stimulišu na dodatnu redukciju sopstvene emisije. EU Emission Trading Scheme obuhvata zemlje članice. Svaka raspolaže dozvoljenom kvotom emisije i raspoređuje je na svoje operatore. Trgovina se obavlja unutar kompanije, između kompanija ili prekogranično. U Evropi se, takođe, vodi akcija za uspostavljanje kvota i za azotne okside i perfluoro karbone, kao i za uključenje što ve-

ćeg broja manjih emitera. Crna Gora mora imati za cilj što brži ulazak u ovu shemu (najvjerovatnije tek po ućlanjenju u EU). Time bi se otvorile mogućnosti za slobodnu i brzu razmjenu novih tehnologija, uz definisanje cilja i brzine kojom se Źeli doići.

Oćigledno je da će, pored pasivne adaptacije i aktivnog ublaŹavanja emisija GSB, odnosno klimatskih promjena, Źto je aktuelno u sadašnjem vremenu i kroz duŹi prelazni period, glavni zadatak u 21. vijeku biti prelazak na obnovljivu, ćistu (dekarbonizovanu), sigurnu i dovoljnu energiju, kao dio koncepta održivog razvoja. Koriććenjem pogodnosti koje će se otvarati, Crna Gora moŹe dobrim pozicioniranjem, istinskim prihvatanjem obaveza, ukljućivanjem u mećunarodnu razmjenu znanja i tehnologija, koriććenjem internacionalnih fondova, podizanjem svijesti o uzrocima i posljedicama, sopstvenom legislativom i na druge naćine dati svoj doprinos i istovremeno riješiti svoje probleme.

Problem nedostatka elektrićne energije u Crnoj Gori, kako je i rećeno, nije moguće prevazići bez izgradnje novih elektrana. Mećutim, u industrijskom i transportnom sektoru postoje i druge opcije i strategije. Prelaskom sa prljavih i energetski zahtjevnih proizvodnji ćelika i aluminijuma, na ćiste, efikasne i profitabilne tehnologije koje pripadaju 21. vijeku, kao i na ćista i efikasna goriva i nove generacije motora, Crna Gora bi napravila znaćajan iskorak u budućnost. Već sama orijentacija, prvo na adaptaciju i ublaŹavanje, a zatim, vjerovatno, i na korake koji slijede, daje priliku za brzi razvoj i primjenu novih tehnologija. Ovdje je, naravno, neophodna strategija tehnoloćkog razvoja, koja bi prepoznala mogućnosti i prednosti Crne Gore i odredila njene prioritete.

## LITERATURA

- [1] US Department of Energy, Basic energy Sciences, Workshop Reports, 2009.
- [2] Climate Change, IPCC Fourth Assesment Report, 2007.
- [3] Kyoto Protocol
- [4] IEA, „Energy, Technologies, Perspectives”, 2008.
- [5] 2009. State of the Future, Global Scenarios
- [6] Strategija razvoja energetike Crne Gore do 2025. godine
- [7] World Energy Council, Deciding the Energy Future: Energy Policy Scenarios to 2050.
- [8] Action Plan for Deriving Dynamic RES- E Policies, Report of the project Green-X, European Commission, 2002.
- [9] Batteries and Electrochemical Capacitors, The Electrochemical Society Interface, 2006.
- [10] US Department of Energy, Hydrogen Program, Annual Progress Report, 2008
- [11] Hydrogen Fuel, Production, Transport and Storage, K. K. Pant R. P. Gupta, 2008
- [12] Sustainable Energy Production and Consumption. F. Barbir, S. Ulgiati, Springer, 2008.
- [13] Mećunarodna agencija za atomsku energiju, Beć.
- [14] Agencija za nuklearnu energiju OECD, Pariz.
- [15] Svjetska nuklearna asocijacija, London.

