

# Skladištenje energije

---

Energijske tehnologije  
FER 2008.



# Sadržaj predavanja

- Što je skladištenje energije
- Zašto skladištimo energiju
- Osnovne značajke spremnika
- Vrste spremnika
- Usporedba načina skladištenja
- Zaključak



# Skladištenje energije

---

- transformacija prijelaznog u stalni oblik energije, pogodan za povratnu transformaciju
- prijelazni:           električna energija, toplinska energija, mehanički rad
- stalni:               neki oblik unutrašnje energije
- ovdje: transformacije električne energije!

# Zašto skladištiti energiju?

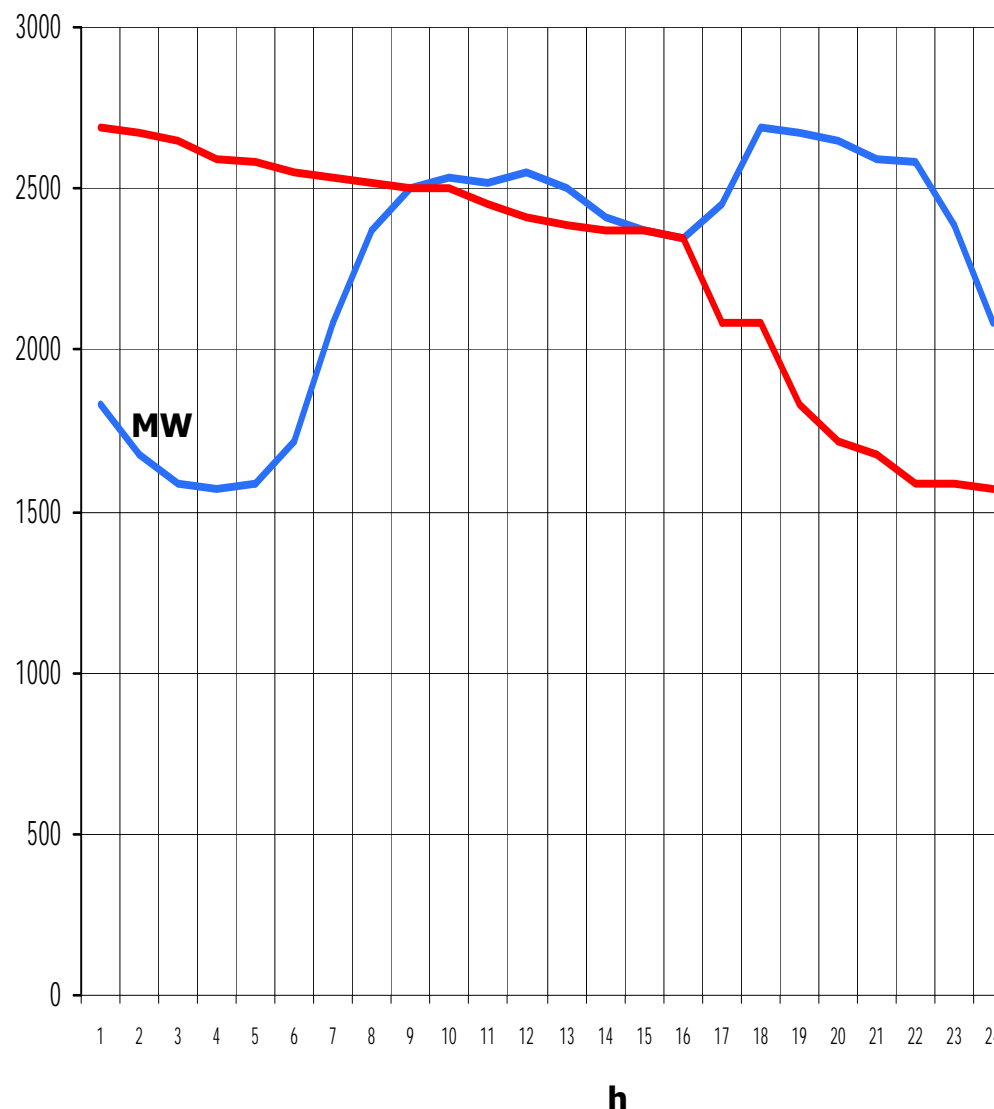
---

1. istovremenost potrošnje i proizvodnje električne energije
2. povremena nedostupnost pojedinih energenata

# Zašto skladištiti energiju? (2)

## 1. istovremenost potrošnje i proizvodnje električne energije

- moguće smanjenje ulaganja u vršna postrojenja
- pouzdanost opskrbe
- kvaliteta električne energije

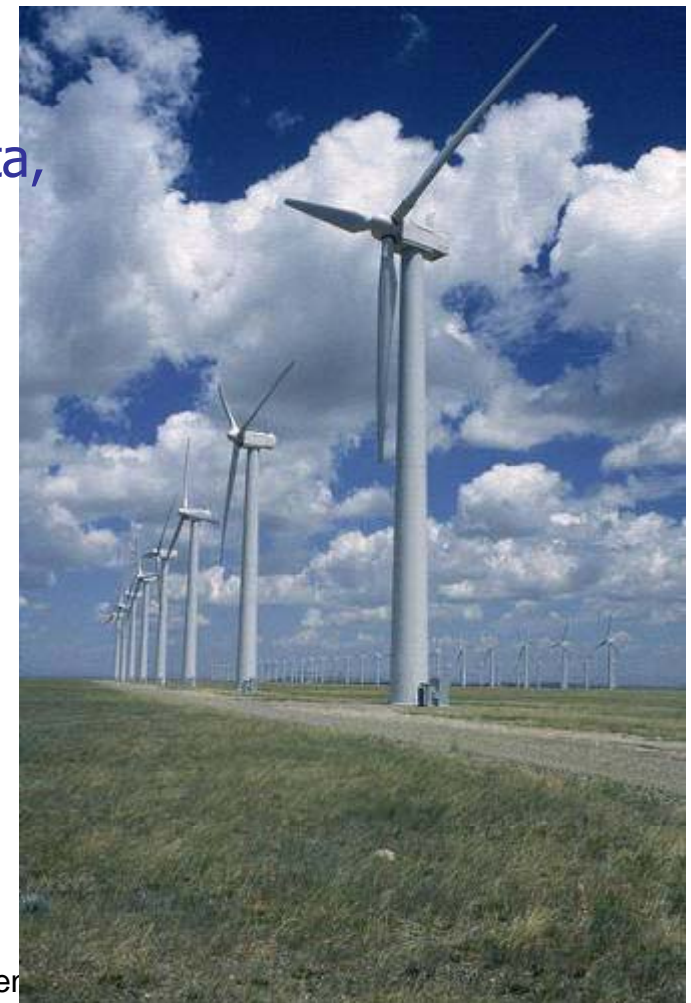
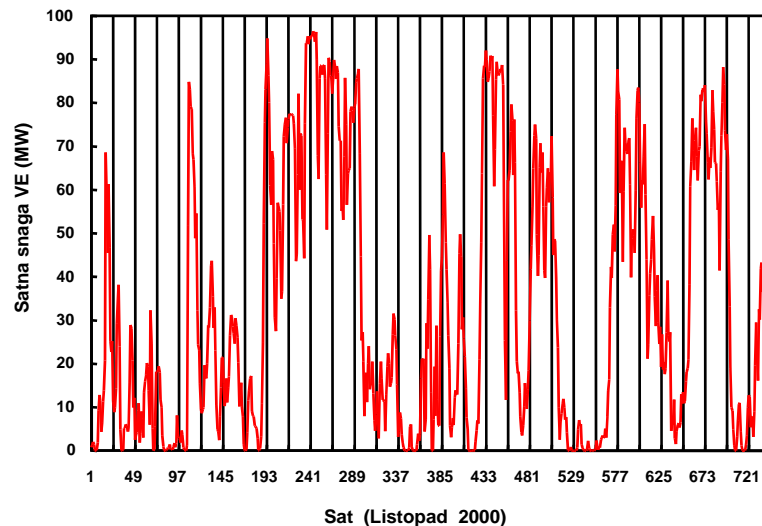


# Zašto skladištiti energiju? (3)

---

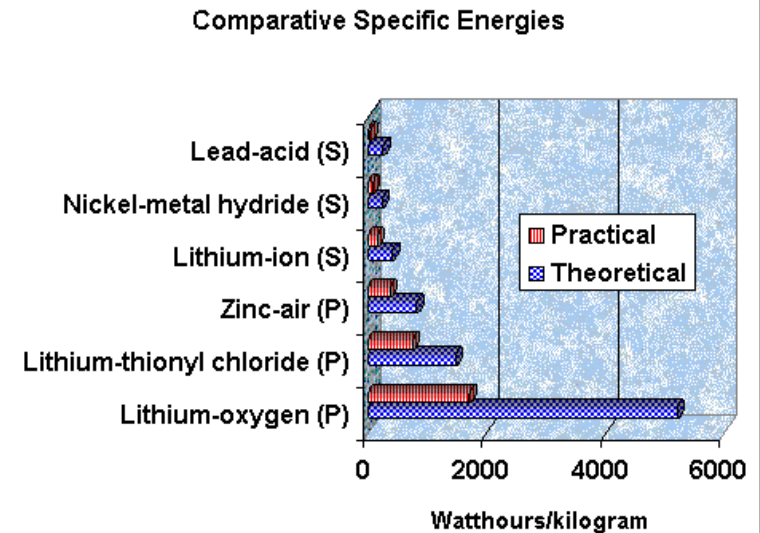
## 2. povremena nedostupnost nekih energenata

- Sunčevo zračenje, vjetar, voda
- spremnik: proizvodi kad nema energenta, skladišti kad je dostupan



# Osnovne značajke spremnika energije

- gustoća energije (volumna ili masena)
  - $e = E_s/m$  [J/kg] i  $e = E_s/V$  [J/m<sup>3</sup>]
  - $E_s$  – energija sadržana u spremniku



- trajanje skladištenja
  - pogonski ciklus spremnika energije sastoji se od tri dijela:
    - punjenje ( $\tau_c$ )
    - skladištenje ( $\tau_s$ )
    - pražnjenje ( $\tau_d$ )

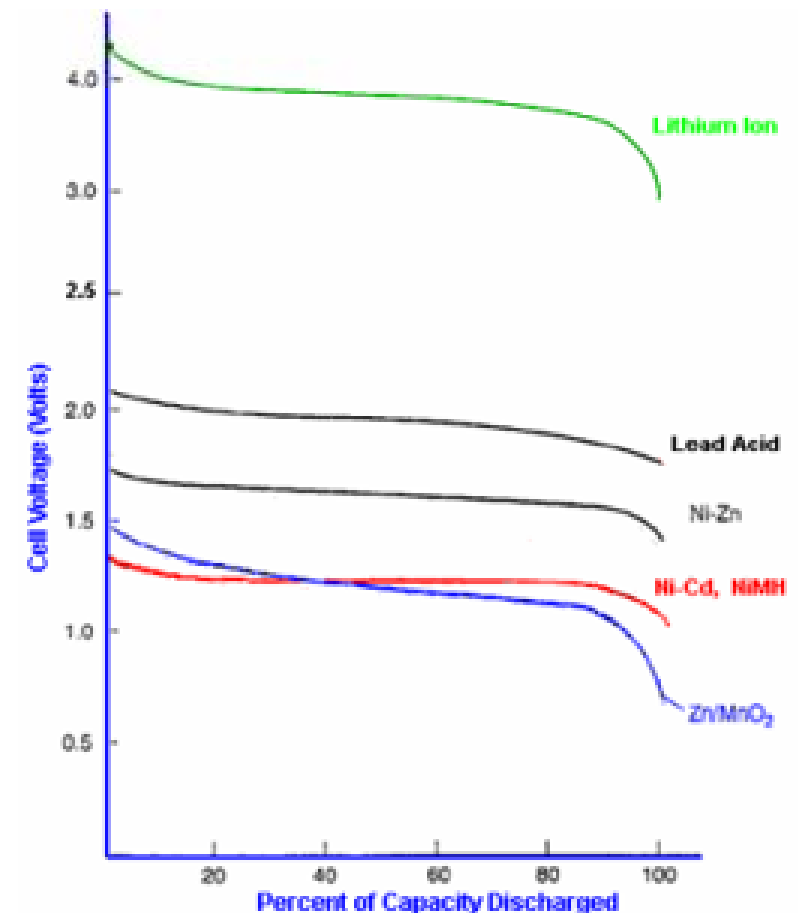
# Osnovne značajke spremnika energije (2)

- učinkovitost skladištenja
  - omjer energije koja napusti spremnik za vrijeme pražnjenja i energije koja uđe u spremnik za vrijeme punjenja

$$\eta_s = E_d/E_c = 1 - E_g/E_c,$$

$E_g$  - energija gubitaka

- brzina punjenja/pražnjenja
  - količina energije u jedinici vremena koja ulazi/izlazi iz spremnika
  - punjenje (*charge*):  $P_c = dE_s/dt$
  - pražnjenje (*discharge*):  $P_d = dE_s/dt$





# Korišteni oblici energije

---

- elektromagnetska potencijalna energija
  - elektrokemijska
  - magnetska
- mehanička energija
  - kinetička
  - gravitacijska potencijalna
- unutrašnja kalorička energija
  - plin pod tlakom

# Elektrokemijska energija

---

- električna potencijalna energija na razini molekula
- spremnici
  - akumulatori
  - punjive baterije
  - reverzibilne gorivne ćelije
  - superkondenzatori



# Akumulatori i punjive baterije

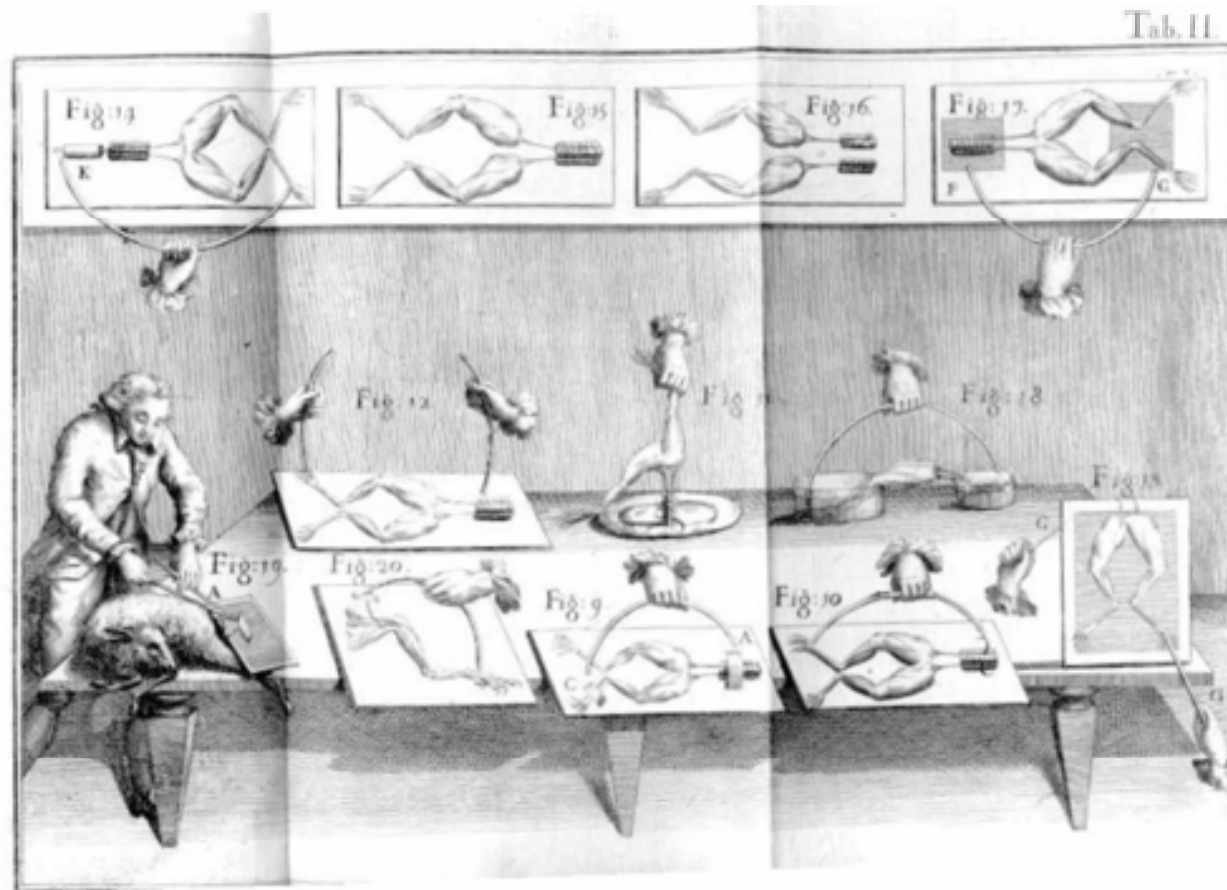
---

- akumulatori i baterije (eng. battery)
- baterija – skup galvanskih elemenata



# Galvanski elektricitet

---



# Galvanski spremnici

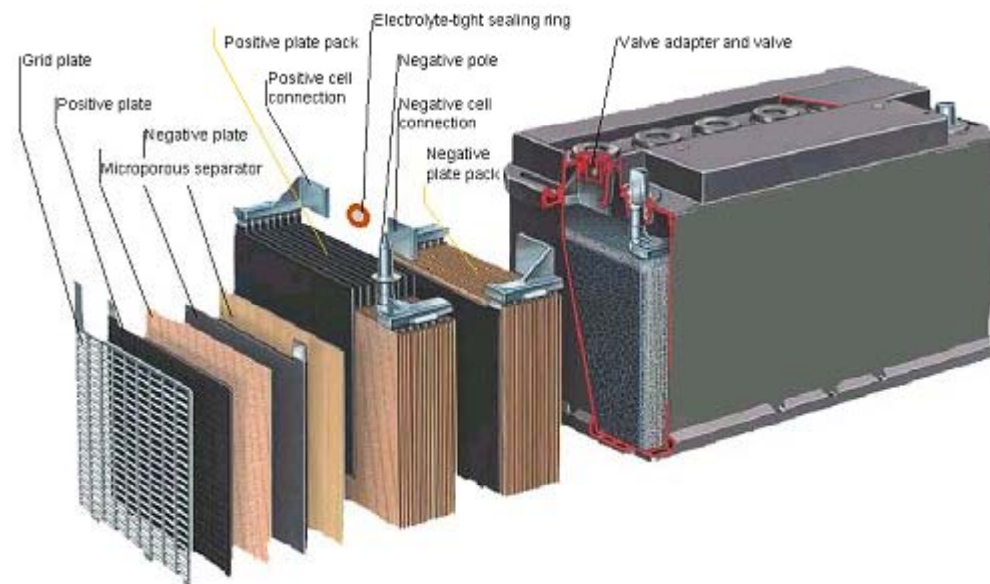
---

- galvanski članci kojima je elektrokemijsko djelovanje reverzibilno
  - kad se baterija/akumulator prazni, teče tzv. galvanska struja
  - prilikom punjenja, električna struja iz vanjskog izvora teče u obratnom smjeru od galvanske
- izvedbe
  - olovni akumulator
  - NiCd baterija
  - NiMH baterija
  - Li-ion baterija
  - ...

# Olovni akumulator

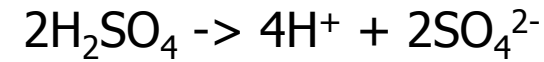
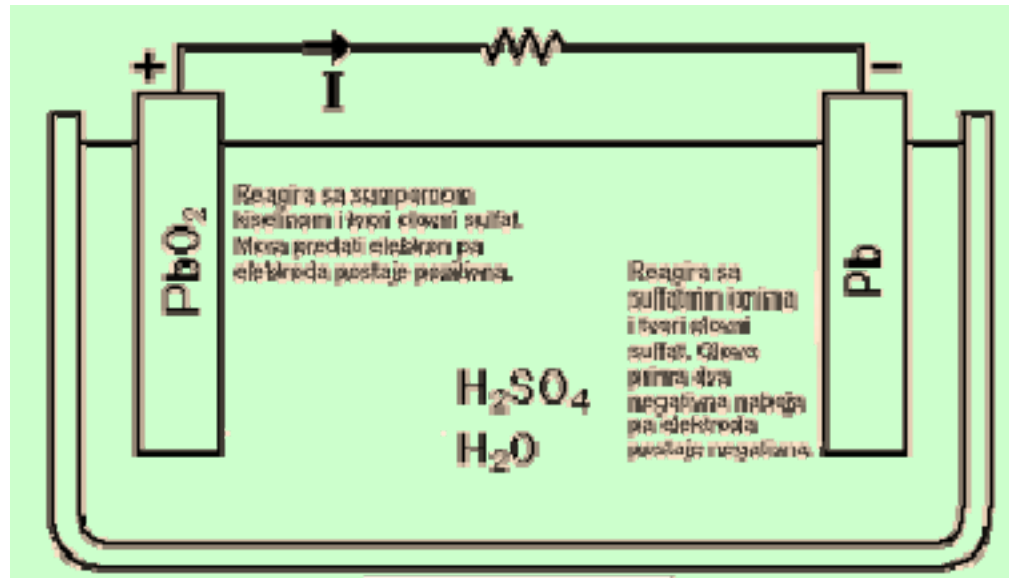
---

- konstruiran 1859. godine, u najširoj upotrebi
- napunjeni akumulator sastoji se od
  - pozitivne elektrode kojoj je aktivna masa olovni dioksid  $\text{PbO}_2$
  - negativne elektrode kojoj je aktivna masa spužvasto olovo  $\text{Pb}$
  - elektrolita – sumporne kiseline  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , razrijeđene destiliranom vodom

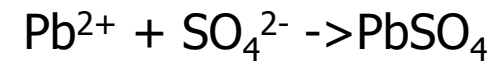


# Olovni akumulator (2)

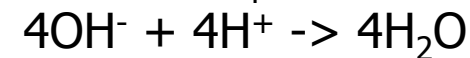
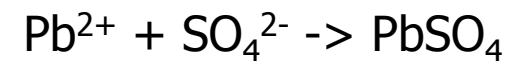
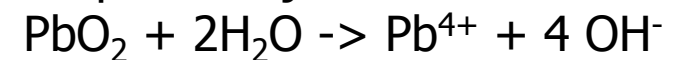
## pražnjenje



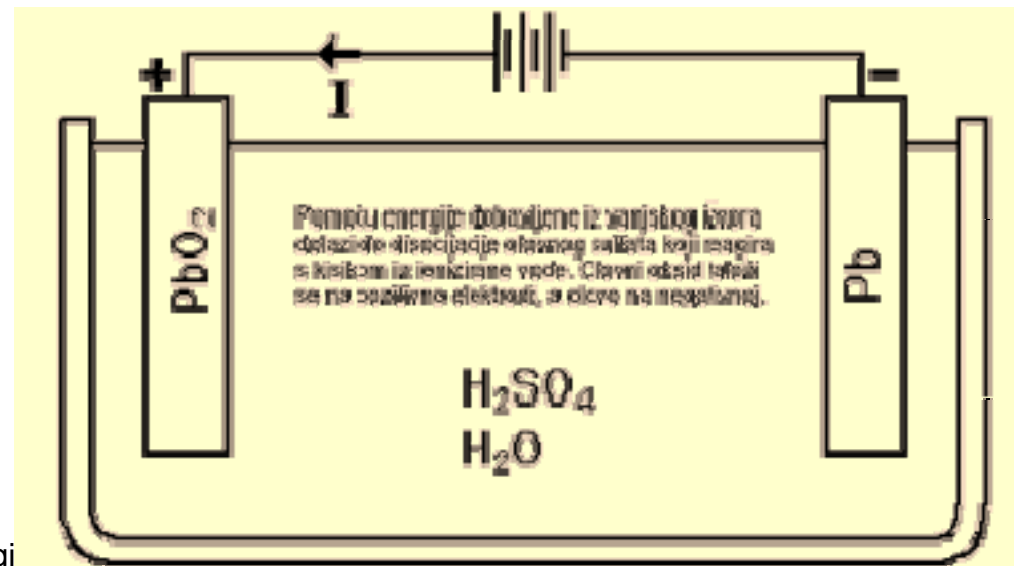
Na negativnoj elektrodi



Na pozitivnoj elektrodi



## punjenje



# Olovni akumulator (3)

---

- prilikom pražnjenja, za dvije molekule utrošene sumporne kiseline (jedna na anodi, jedna na katodi), dva električna naboja prijeđu kroz članak od negativne na pozitivnu elektrodu
- na objema elektrodama nastaje olovni sulfat
- $U = E - IR_U$
- $I = E / (R_U + R_T)$
- $I = nF$ 
  - $n$  – broj molova elektrona po molu  $H_2SO_4$  (=1)
  - $F$  – Faradayeva konstanta (električni naboj sadržan u jednom molu elektrona, 96487 C/mol)



# Zadatak 1: Olovni akumulator

---

12 V olovni akumulator pri određenom opterećenju daje struju jakosti 60 A. Potrebno je izračunati trenutnu snagu koju akumulator daje i potrošnju sumporne kiseline u g/s.

$$U = 12 \text{ V}$$

$$I = 60 \text{ A}$$

$$P = ?$$

$$dm_{\text{H}_2\text{SO}_4}/dt = ?$$

$$\text{Trenutna snaga } P = UI = 720 \text{ W}$$

Potrošnja  $\text{H}_2\text{SO}_4$  određena je sljedećom jednačinom

$$N_{\text{H}_2\text{SO}_4} = I/F \text{ [mol/s]}$$

$$= 60[\text{A}] / 96487 \text{ [C/mol]}$$

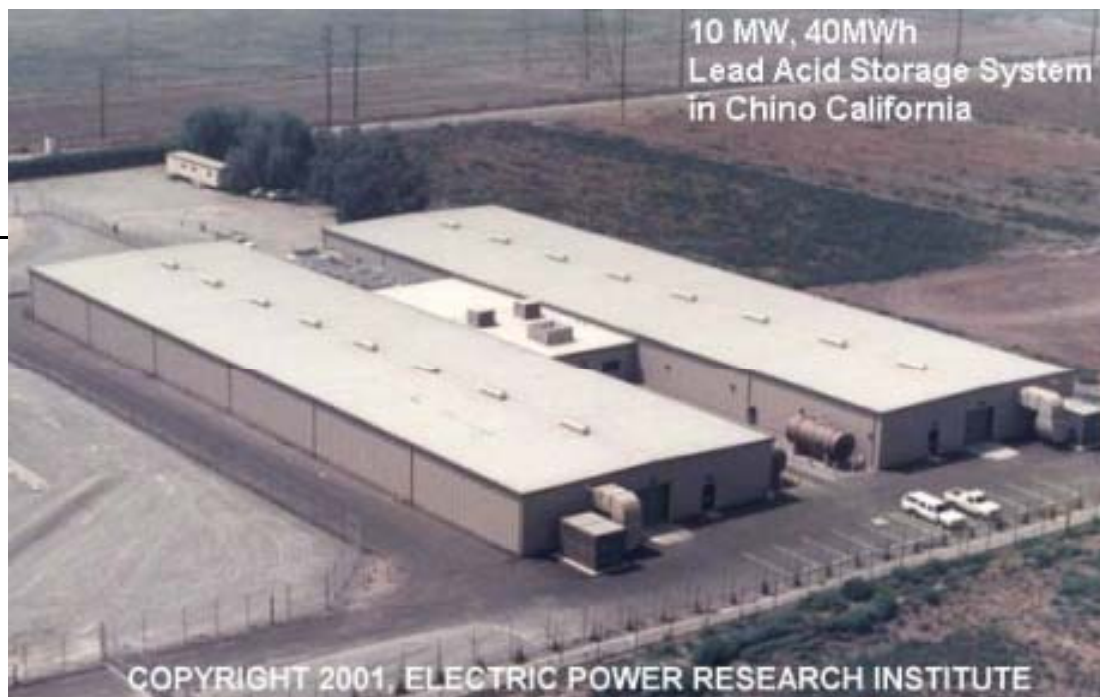
$$= 6,22 \cdot 10^{-4} \text{ mol/s}$$

$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = N_{\text{H}_2\text{SO}_4} M_{\text{H}_2\text{SO}_4} \text{ [g/s]} = 6,22 \cdot 10^{-4} \text{ [mol/s]} (2+32+4 \cdot 16) \text{ [g/mol]}$$

$$= 0,061 \text{ g/s}$$

# Podjela akumulatora

- prema namjeni
  - napajanje potrošača
  - pokretanje motora
  - pogon vozila
- prema ciklusu
  - starteri
  - potpuno pražnjenje akumulatora (*deep – cycle*)
- prema izvedbi
  - mokri
  - gel
  - silikatno staklo



# Punjive baterije

---

- **nikal-kadmijska baterija**
  - najveći broj punjenja i pražnjenja (više od 1500 ciklusa),
  - niska gustoća energije
  - memorijski efekt, ali smanjen zahvaljujući razvoju
  - kadmij je otrovan, pa predstavlja opasnost po okoliš
  - katoda:    nikal
  - anoda:    kadmij
- **nikal-metal hidridna baterija**
  - slične NiCd, ali je anoda hidridna legura, pa je manje štetna po okoliš
  - može imati nekoliko puta veći kapacitet od NiCd baterije iste veličine
  - manje izražen memorijski efekt
  - koristi se u hibridnim vozilima, npr. Toyota Prius i potrošačkoj elektronici

# Punjive baterije (2)

- litij-ionska baterija
  - velika gustoća energije
  - posve uklonjen memorijski efekt
  - katoda:  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiNiO}_2$  ili Li-Ph
  - anoda: ugljik
  - primjena: laptop, mobitel, MP3 playeri...

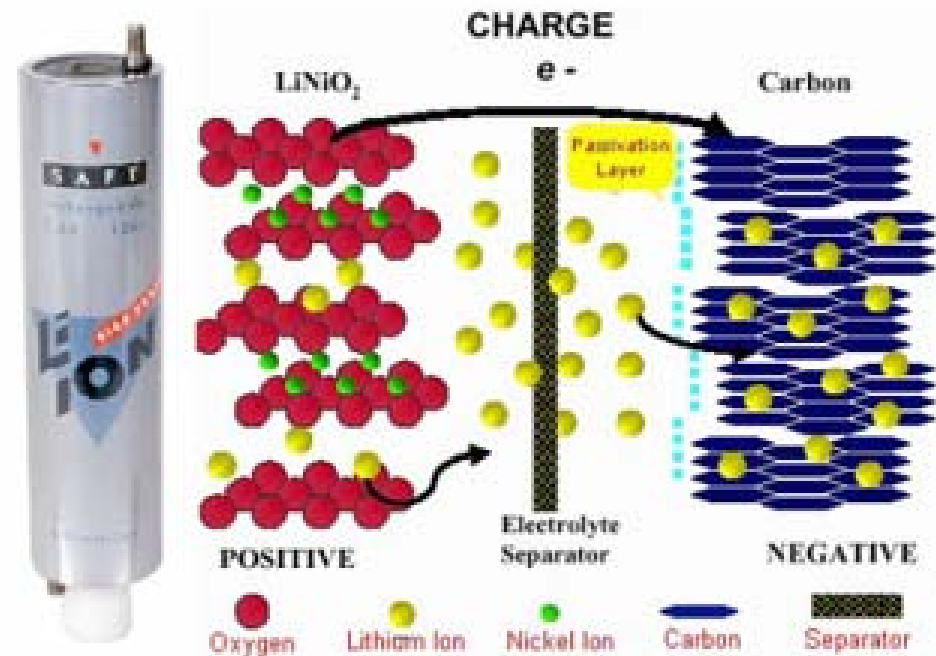
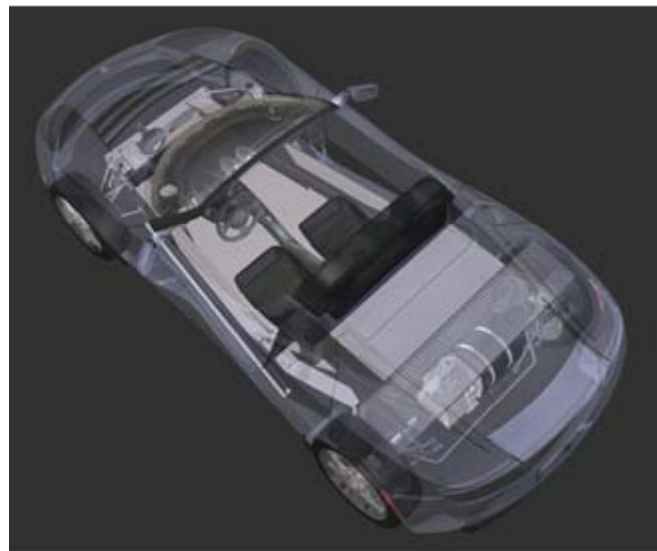


Photo Courtesy of SAFT America



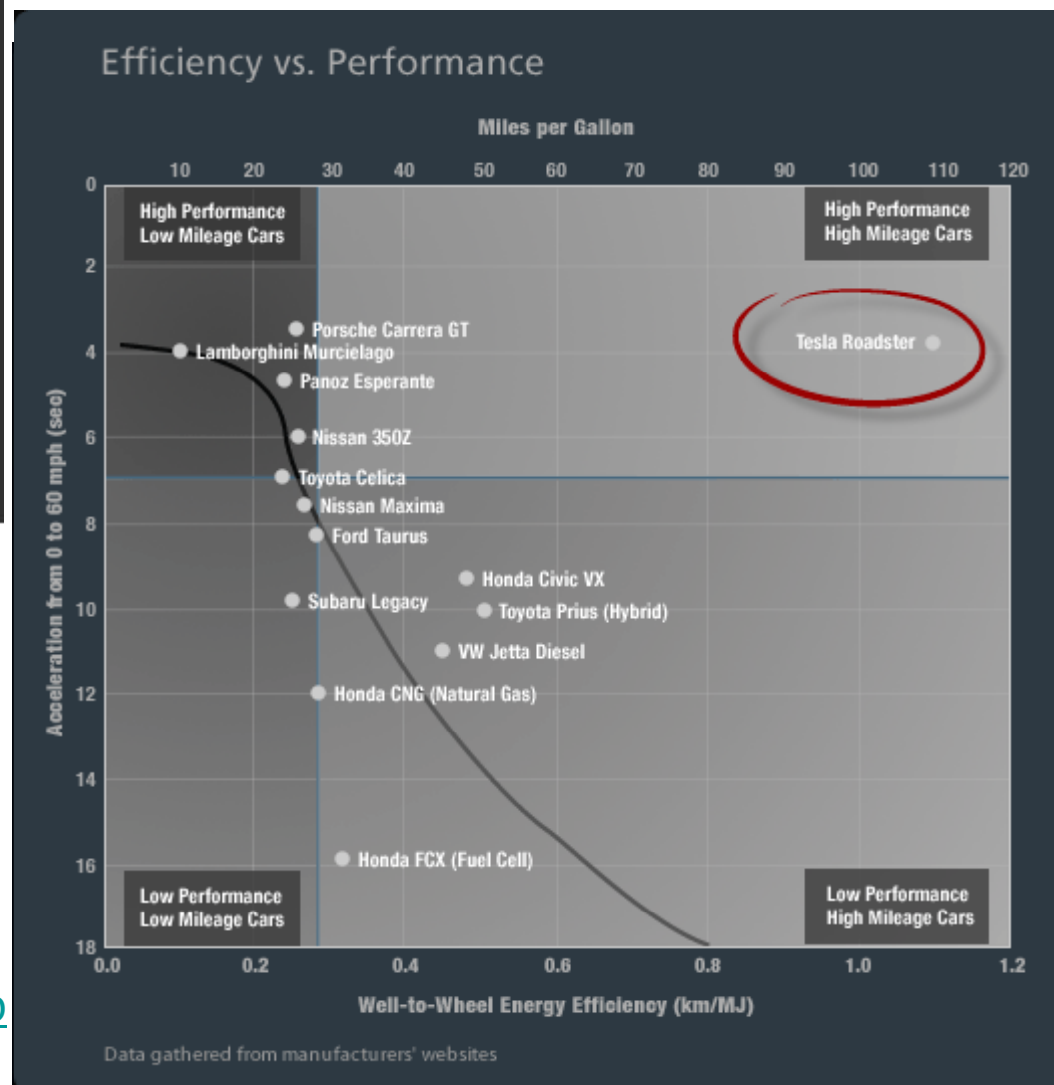
## - elektromobil

100 000 km vožnje s Li-ion baterijom (više tisuća)  
350 km po punjenju



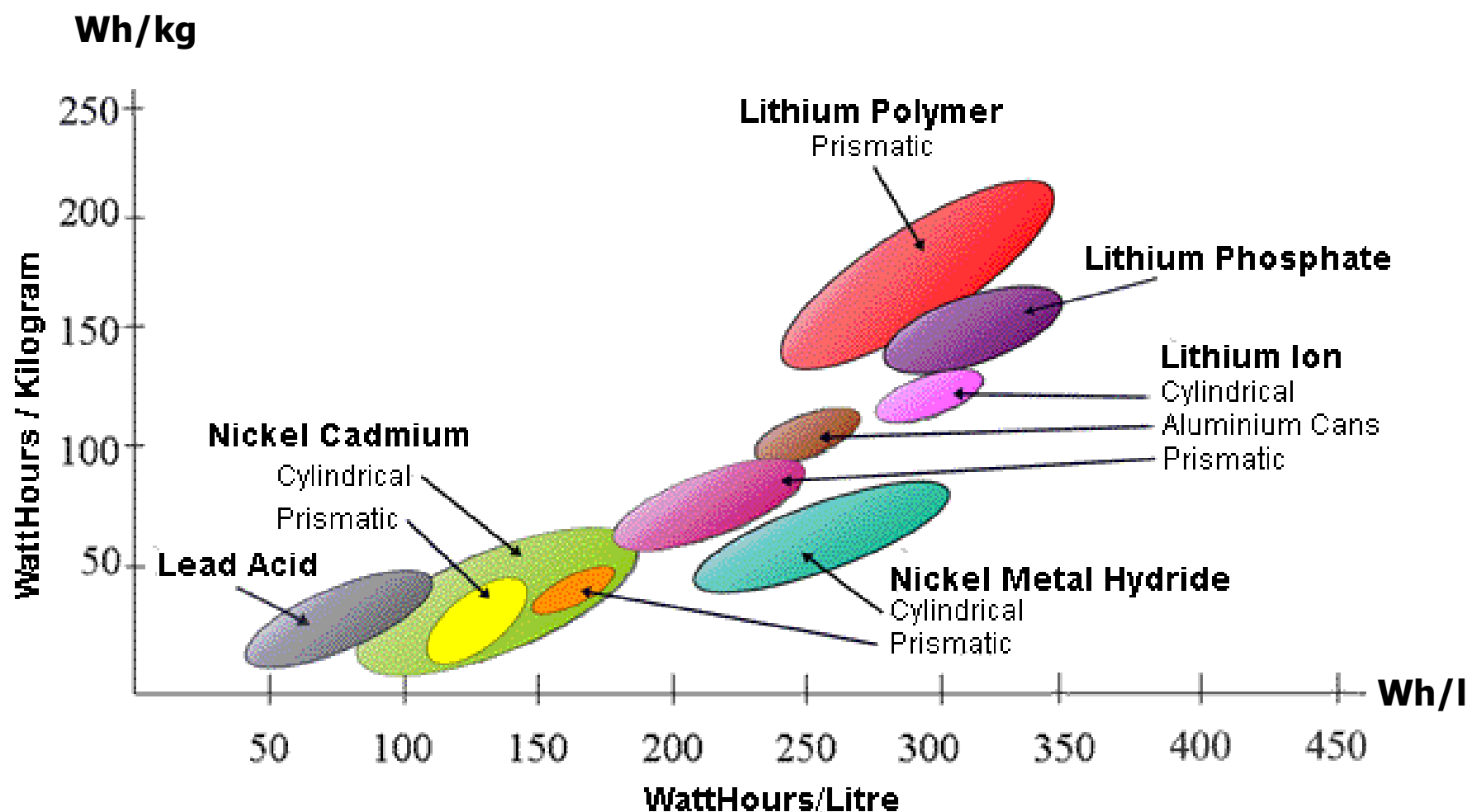
<http://www.teslamotors.com/index.php>

2008.



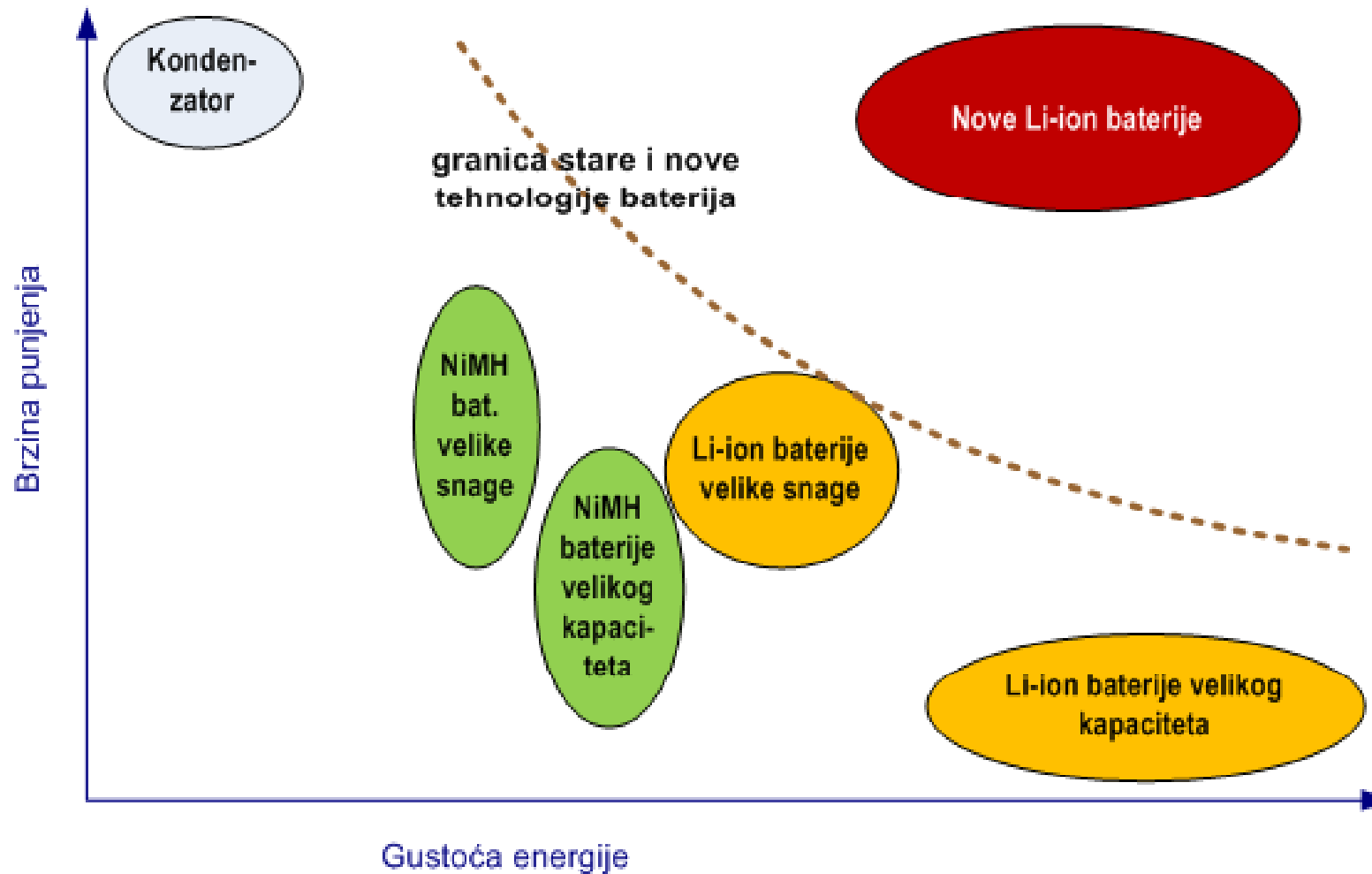
# Baterije i olovni akumulator - usporedba

## Energetska gustoća – po jedinici mase i volumena



# Usporedba baterija

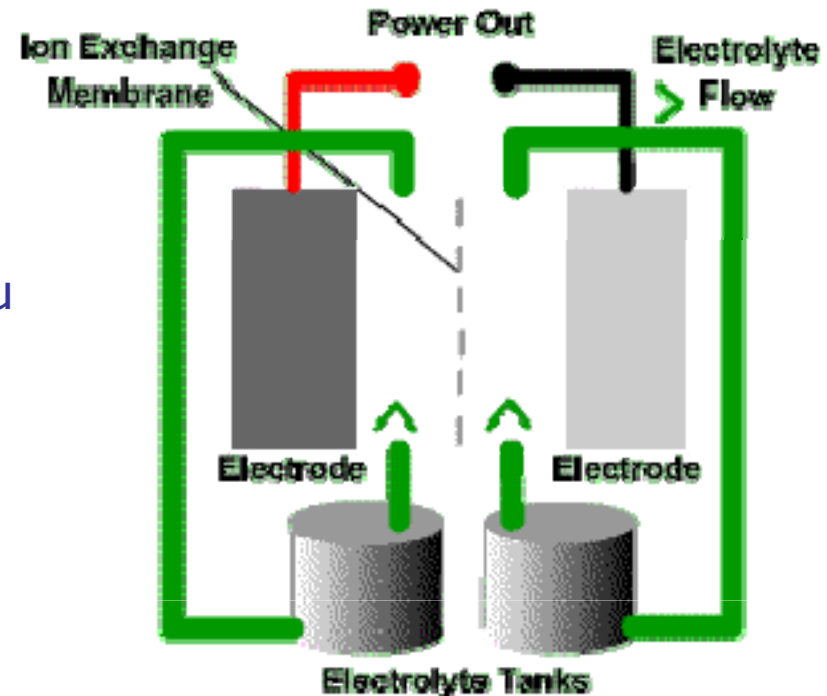
## - brzina punjenja i gustoća energije





# Reverzibilne gorivne ćelije

- Proces u svakoj gorivnoj ćeliji može biti reverzibilan
- 'pražnjenje':
  - u reakciji tvari A i B proizvodi se električna energija i tvar C
- 'punjenje':
  - uz potrošnju električne energije iz tvari C proizvode se tvari A i B
- reverzibilnost  
=> način skladištenja energije
- problem:
  - niska učinkovitost u jednom smjeru





# Superkondenzatori

- kapacitet idealnog pločastog kondenzatora

- $\epsilon$  je produkt relativne permitivnosti i permitivnosti praznog prostora

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d}$$

- energija pohranjena u kondenzatoru

$$E = \frac{CU^2}{2}$$

- razlike prema konvencionalnom kondenzatoru

- velika površina ploča
  - mali razmak među pločama
  - kapacitet nekoliko tisuća F!

- prednosti u odnosu na baterije

- brže punjenje i pražnjenje,
  - nema kemijskih reakcija – veća trajnost materijala i veći broj ciklusa
  - veći raspon napona
  - mogućnost čestih pulseva energije



# Magnetski spremnici energije

- energija magnetskog polja dana je formulom

–I jakost struje [A]

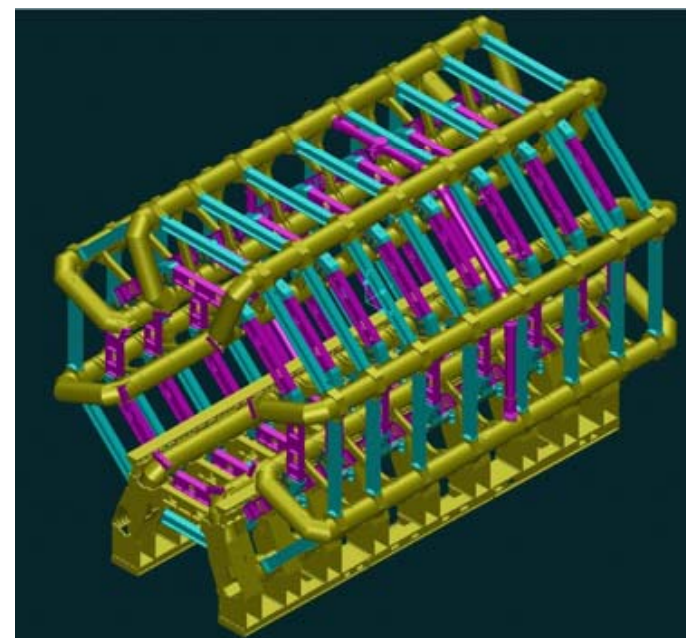
$$E = \frac{LI^2}{2}$$

–L induktivitet [H]; za selenoid:

- za feromagnetske materijale ovisi o magnetskom toku
- $\mu$  produkt relativne permeabilnost i permabilnosti praznog prostora

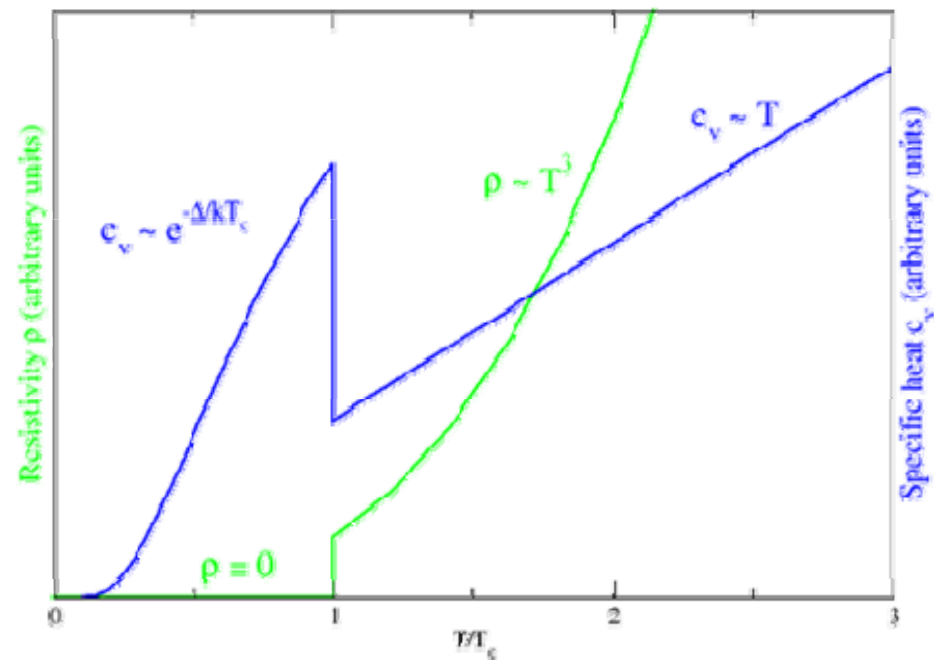
$$L = \mu \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l}$$

- skladištenje magnetske energije zasniva se na supravodičima

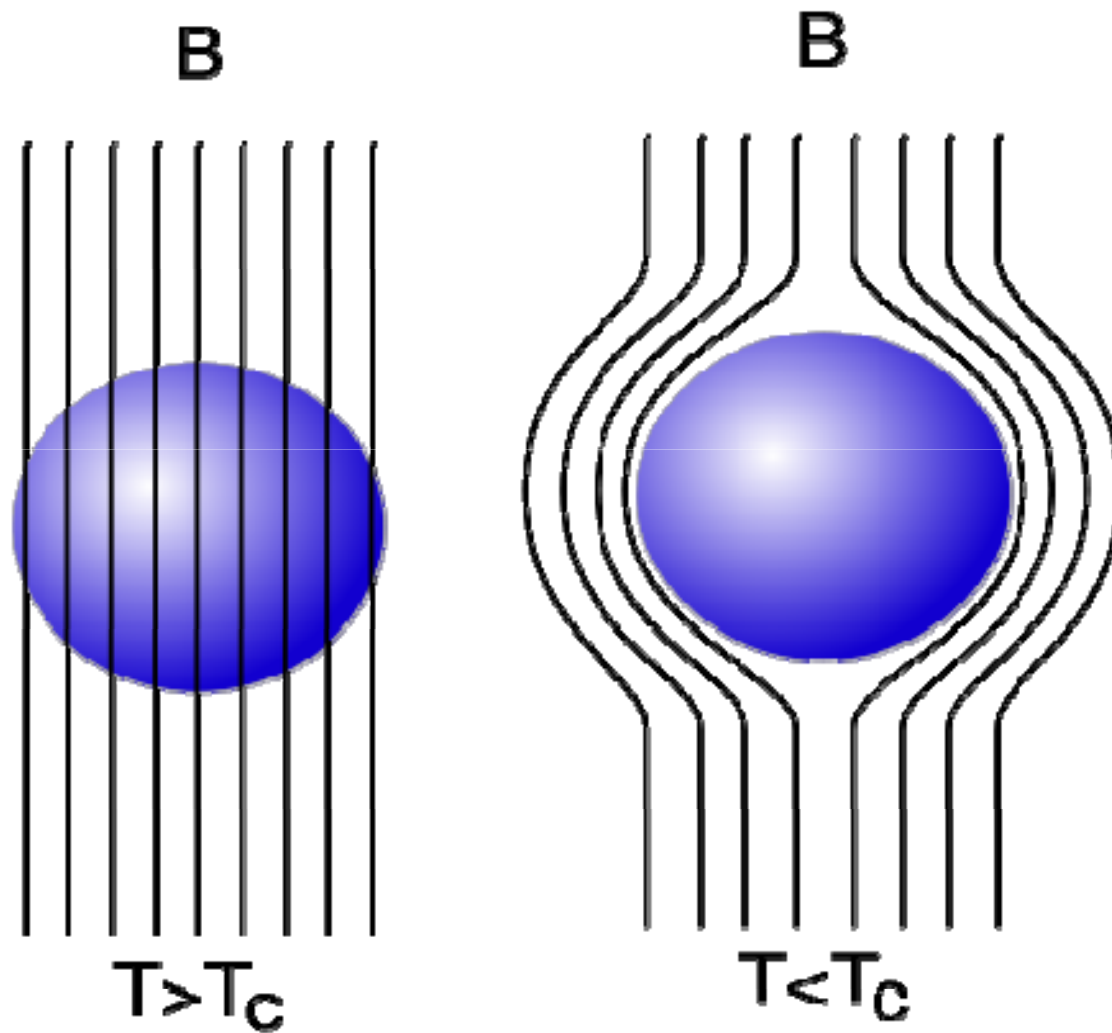


# Supravodiči

- materijali koji na dovoljno niskim temperaturama gube električni otpor i pritom iz svoje unutrašnjosti istiskuju magnetska polja
- priroda supravodljivosti je kvantna
- električni otpor vodiča posljedica je raspršenja elektrona u gibanju na primjesama i drugim defektima kristalne rešetke
- povezivanjem elektrona u parove raspršenje postaje nedjelotvorno i javlja se supravodljivost
- zbog pada električnog otpora na nulu, električna struja može bez gubitaka teći supravodljivim krugom



# Meissnerov efekt



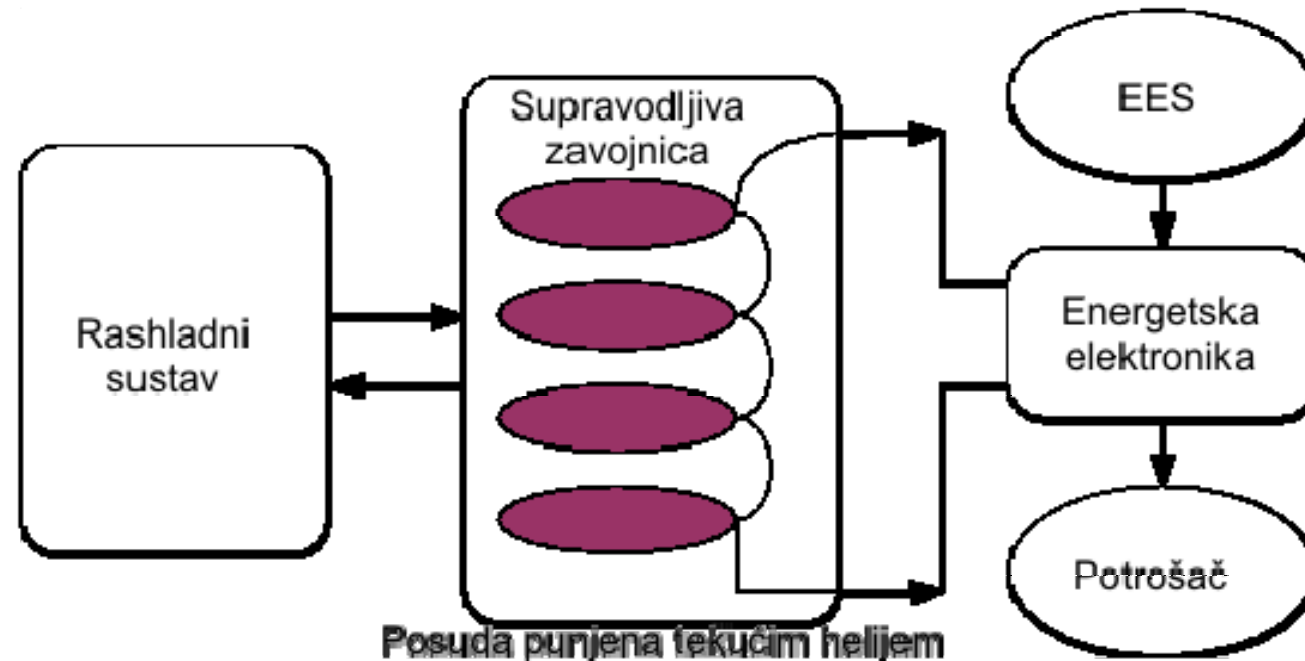
# Supravodiči i skladištenje energije

---

- magnetsko polje
  - indukcija do 15 T
  - istosmjerna struja u supravodljivoj zavojnici
- prednosti:
  - pohranjena energija do 200 MWh
  - velika trajnost, uz osiguranje hlađenja
  - električna energija je gotovo trenutno raspoloživa
  - visoka učinkovitost, oko 85%
  - nepokretni dijelovi => pouzdanost
- nedostatci:
  - temperatura, magnetska indukcija, struja i frekvencija
  - Hg 4,16 K
  - organski spojevi – Nb<sub>3</sub>Sn, 23 K, 30 T
  - visokotemperaturna supravodljivost – anizotropni keramički materijali, 125 K (-148°C!)
    - hlađenje ukapljenim dušikom umjesto helijem!

# Supravodiči i skladištenje energije (2)

- sustav se sastoji od tri dijela:
  - supravodljiva zavojnica
  - energetska elektronika
  - hladioc
- ispravljač/izmjenjivač ispravlja izmjeničnu struju i izmjenjuje istosmjernu struju (gubici 2-3%)



# Spremnici mehaničke energije

---

- spremnici kinetičke energije
  - zamašnjak
  - pohranjuje energiju kretanja
  - baziraju se na rotacijskom gibanju
- spremnici gravitacijske potencijalne energije



# Zamašnjak

---

- velika gustoća energije
- trajan
- naprezanje najveće na rubovima

$$I = \int r^2 \rho dV$$

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

E – pohranjena energija

I – moment inercije

$\omega$  – kutna brzina

- punjenje
  - električni motor pokreće zamašnjak
  - akumulira se energija rotacije

- pražnjenje
  - zamašnjak pokreće rotor generatora
  - generatorski režim rada



# Razvoj sustava sa zamašnjakom

---

- sve privlačniji razvojem novih materijala i tehnologija

čelik 24 Wh/kg

azbest 320 Wh/kg

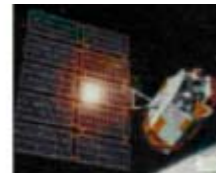
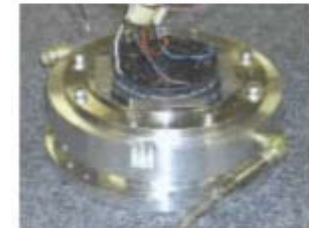
$\text{Al}_2\text{O}_3$  513 Wh/kg



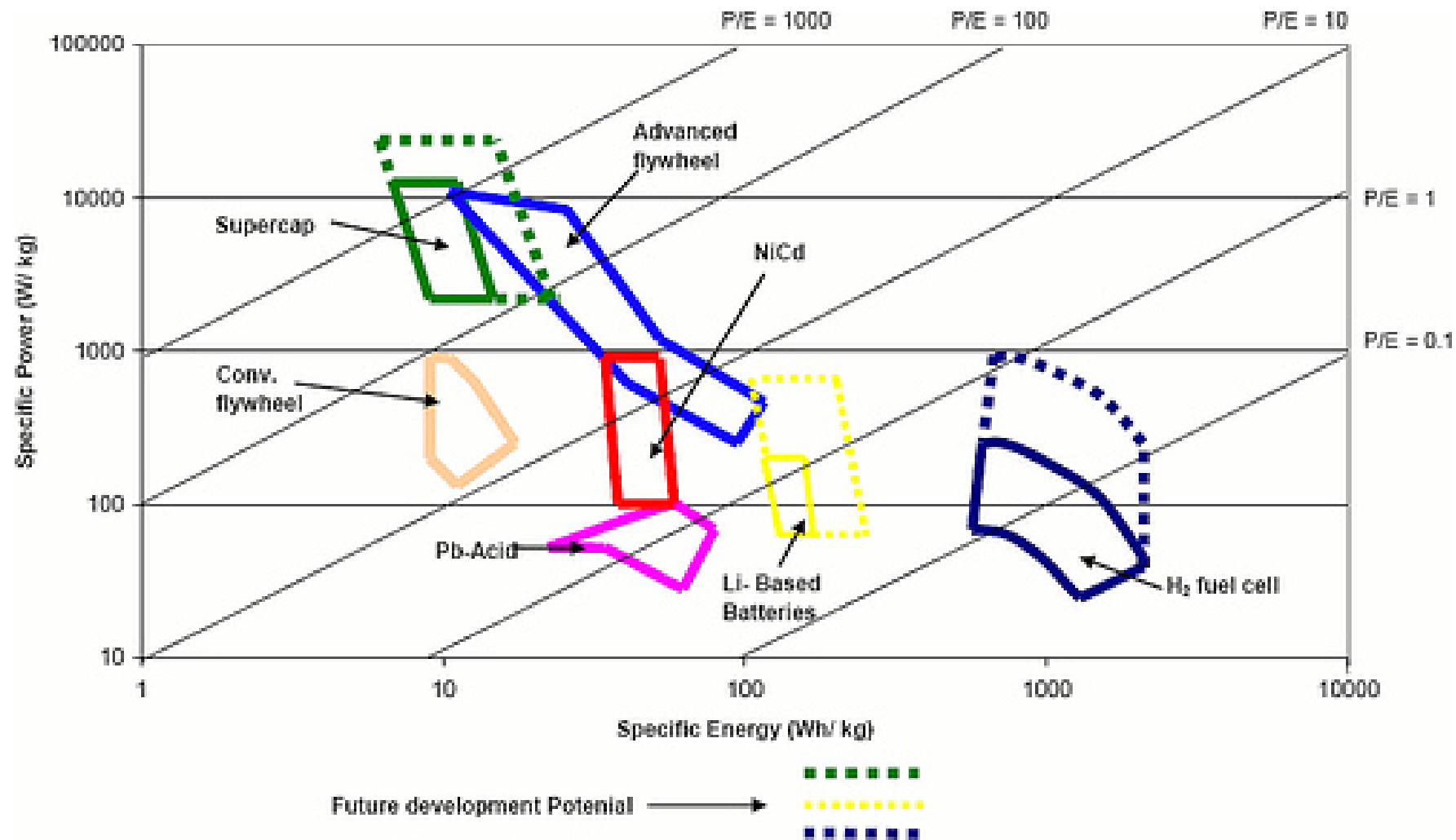
- razvoj: materijali, eksperimenti s oblicima

- Izazovi:

- upravljanje snagom i momentom
- visoka gustoća energije
- efikasnost (magnetski ležajevi, motor, elektronika)
- sigurnost
- integriranje

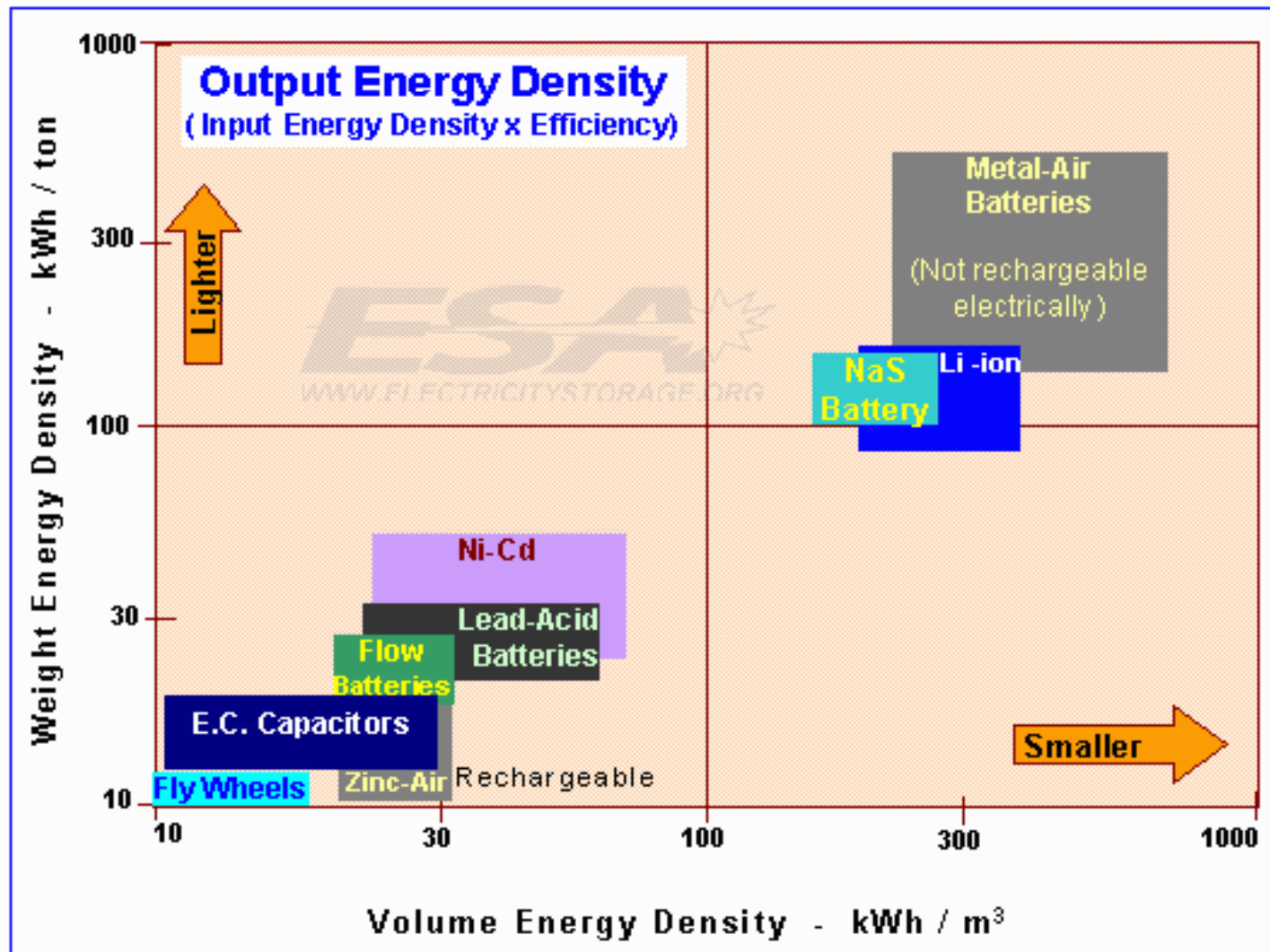


# Usporedba - snaga i energija po kg



# Usporedba

## - volumna i masena gustoća energije



# Spremnici gravitacijske potencijalne energije

- u gravitacijskom polju

$$W_{\text{pot}} = mgh$$

100 t na 10 m =>  $E_p = 2,73 \text{ kWh}$

- ne zaboraviti efikasnost
- primjenjivo kod skladištenja vodnih snaga
  - reverzibilna hidroelektrana



- srednji energetske ekvivalent: **1,25 kWh/m<sup>3</sup>** (HEP)

Godišnja proizvodnja	2006. (HEP)
Generatorski rad	405 GWh
Motorski rad	177 GWh

2008.



# Reverzibilna hidroelektrana

---

- koriste se dva bazena – gornji i donji
  - ili konfiguracija terena omogućava prirodne spremnike, ili se donji spremnik ukopava
- postrojenje može raditi kao elektrana
  - voda pokreće turbinu
  - turbina okreće generator
- ... i kao pumpa
  - generator se prebaci u motorski režim rada
  - turbina služi kao pumpa

# Reverzibilna hidroelektrana (2)

---

- gubici
  - dio vode zaobilazi lopatice turbine
  - pretvorba u toplinu zbog trenja
  - isparavanje vode iz bazena
- ukupna učinkovitost od ispod 65% do 85%
- prednosti
  - poznata tehnologija
  - visoka pouzdanost
  - niski troškovi održavanja
  - brzi start (1/2-3 min)
- nedostaci
  - veliko zauzeće zemljišta (skupo, sve skuplje)
  - dugotrajna izgradnja

## Zadatak 2: Reverzibilna hidroelektrana

Srednji godišnji protok reverzibilne hidroelektrane jednak je instaliranom protoku i iznosi  $55 \text{ m}^3/\text{s}$ , a neto pad  $510 \text{ m}$ . Učinkovitost pretvorbe mehaničke u električnu energiju iznosi  $85\%$ , a učinkovitost pumpanja  $60\%$ . Faktor opterećenja hidroelektrane iznosi  $0,285$  za proizvodnju el. en. U razdobljima niske cijene električne energije sva utrošena voda prebacuje se iz donjeg u gornji bazen.

1. Kolika je instalirana snaga elektrane?
2. Koliko se električne energije za pumpanje potroši iz mreže?
3. Kolika je učinkovitost čitavog ciklusa skladištenja energije?
4. Koliki je najmanji volumen spremnika potreban?

$$Q_{\text{sr}} = 55 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h_{\text{neto}} = 510 \text{ m}$$

$$\eta_{\text{m\_el}} = 0,85; \eta_{\text{p}} = 0,6$$

$$m = 0,285$$

## Zadatak 2: Reverzibilna hidroelektrana

---

Instalirana snaga RHE:

$$\begin{aligned} P_{el} &= \eta_{m\_el} P_{meh} = \eta_{m\_el} \rho g h_{neto} Q = \\ &= 0,85 \cdot 1000[\text{kg/m}^3] \cdot 9,81[\text{m/s}^2] \cdot 510[\text{m}] \cdot 55[\text{m}^3/\text{s}] \\ &= 234 \text{ MW} \end{aligned}$$

Proizvedena el. en. u RHE:

$$E_{el\_god} = P_{el} t_{el} = 234 [\text{MW}] \cdot 0,285 \cdot 365 \cdot 24 [\text{h}] = 584 \text{ GWh}$$

-da bi se ta energija proizvela, u gornjem spremniku treba biti akumulirano energije:

$$E_{akumulirano} = E_{el\_god} / \eta_{m\_el} = 584 / 0,85 = 687 \text{ GWh}$$

-akumulacija energije u gornjem spremniku postignuta je pomoću pumpi, čija je efikasnost 60%

-električna energija potrebna za pogon pumpi iznosi

$$E_{el\_p} = E_{akumulirano} / \eta_p = 687 [\text{GWh}] / 0,6 = 1145 \text{ GWh}$$



## Zadatak 2: Reverzibilna hidroelektrana

---

učinkovitost ciklusa skladištenja energije

$$\begin{aligned}\eta_{uk} &= E_{\text{dobiveno}}/E_{\text{ulozeno}} \\ &= E_{\text{el\_god}}/E_{\text{el\_p}} \\ &= 584 / 1145 \\ &= 0,51\end{aligned}$$

potrebni volumen spremnika

$$\begin{aligned}V &= Q \cdot t = Q \cdot m \cdot t_{\text{god}} \\ &= 55 \text{ [m}^3\text{/s]} \cdot 0,285 \cdot 8760 \text{ [h]} \cdot 3600 \text{ [s/h]} \\ &= 495 \text{ e6 m}^3\end{aligned}$$

# Spremnici unutrašnje kaloričke energije

- spremnici plina pod tlakom

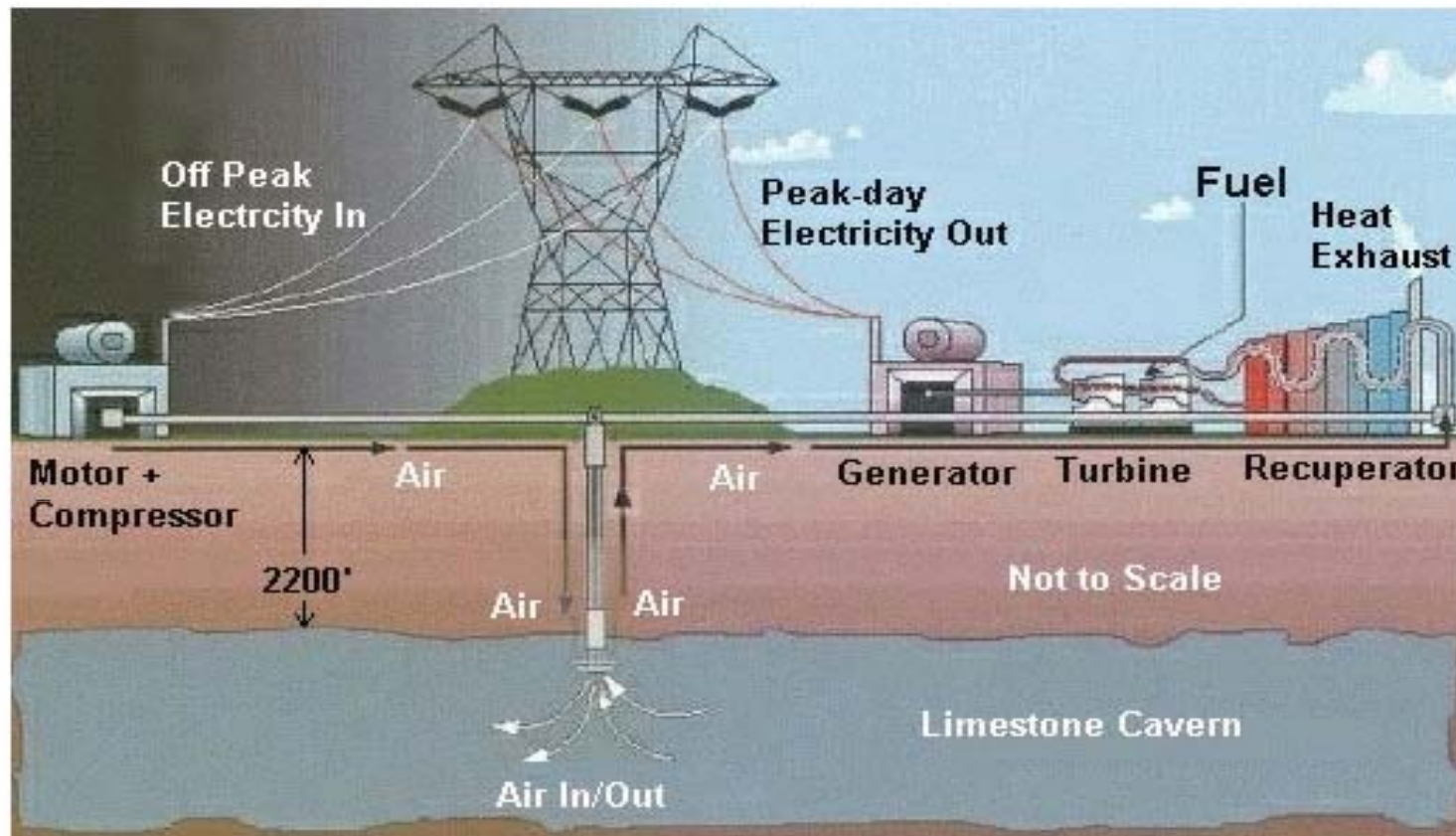


Photo Courtesy of CAES Development Company

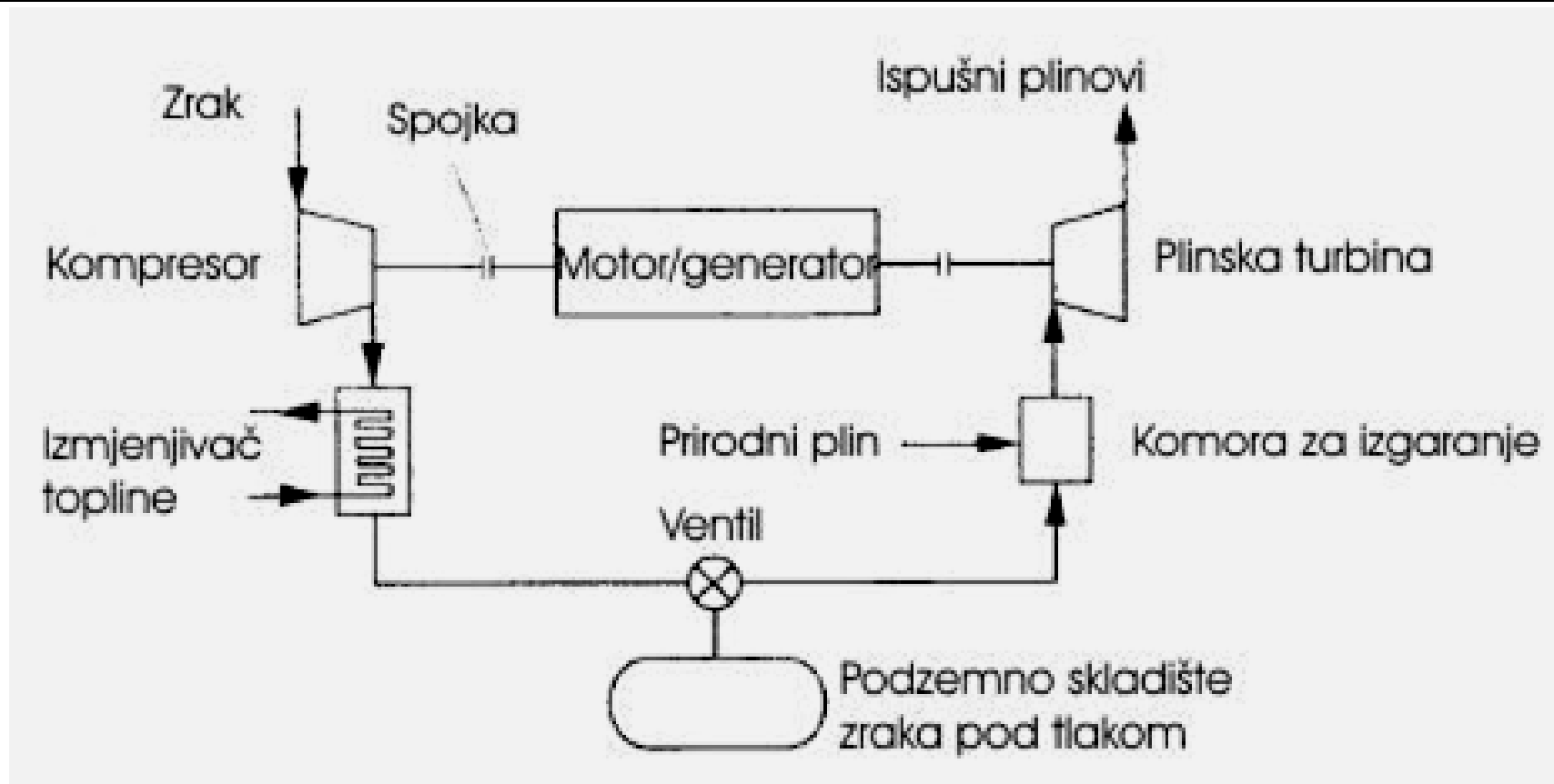
# Skladištenje komprimiranog zraka

---

- u tlu postoje ili se mogu napraviti spremnici zraka – rudnici, podzemni džepovi
- u razdobljima niske potrošnje (i cijene) električne energije, kompresorom se tlači zrak u podzemno spremište
- najčešće:
  - zrak koji izlazi iz kompresora pohranjuje se u spremnik (pod tlakom)
  - kad je potrebno, vraća se u turbinu (komoru za izgaranje)
- energija predana sustavu pohranjuje se u obliku unutrašnje kaloričke energije plina

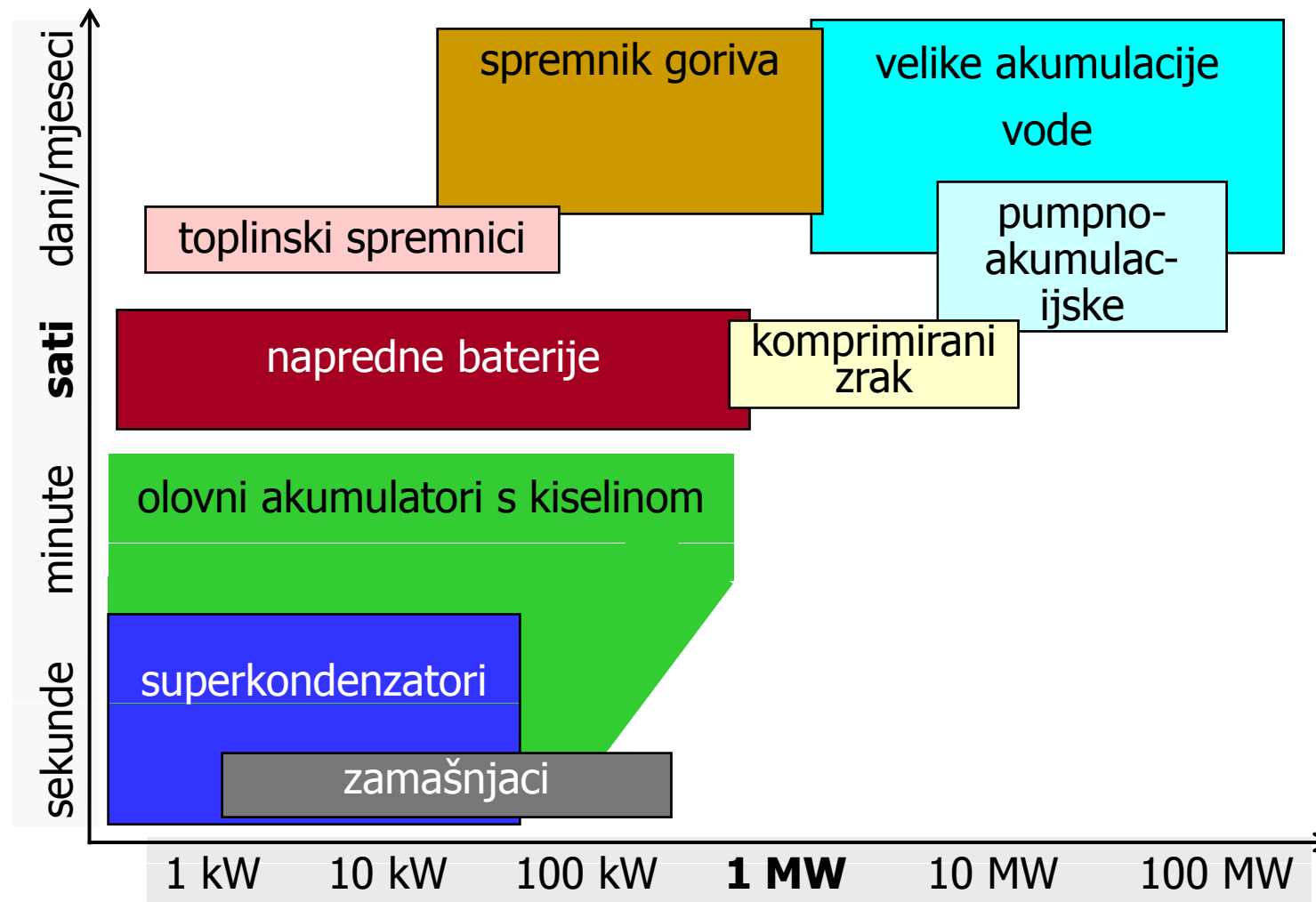
=> bolje iskorištenje goriva

## Skladištenje komprimiranog zraka (2)



- danas u svijetu postoje dva ovakva spremnika
  - u Njemačkoj, 290 MW
  - u SAD, 100 MW

# Usporedba spremnika - vrijeme i snaga



# Zaključak

---

- postoje različiti načini skladištenja energije
  - elektrokemijska potencijalna
  - magnetska
  - mehanička
  - unutrašnja kalorička
- svaki način ima svoje prednosti i nedostatke
- najvažniji elementi pri izboru su
  - snaga i količina energije
  - gustoća energije
  - učinkovitost i brzina punjenja-pražnjenja
  - trajnost pohrane energije
  - cijena, trajnost, održavanje, sigurnost

# Zadatak

---

Gornja akumulacija hidroelektrane smještena je 200 m iznad rijeke. Stupanj je djelovanja crpenja vode 0,65, a proizvodnje električne energije 0,85. Odredite:

- a) električnu energiju (MWh) potrebnu za dnevno crpenje vode u gornju akumulaciju kako bi hidroelektrana proizvodila 400 MWh dnevno;
- b) volumen vode koja se dnevno prebacuje u gornju akumulaciju kako bi se ostvarila proizvodnja pod a).

Računajte s neto visinom od 200 m.

## Zadatak - nastavak

---

a) 
$$W_{p.dnevno} = \frac{100MW \cdot 4h}{0,65 \cdot 0,85} = 723,98MWh$$

- b) volumen potrebne vode određuje potrebna proizvodnja el. en. i efikasnost. Za proizvodnju 400 MWh potrebno je, uz efikasnost od 85%, pohraniti u akumulaciji energiju:

$$W_{ak.} = \frac{400MWh}{0,85} = 470,59MWh = 1,694 \cdot 10^{12} J.$$

To je gravitacijska potencijalna energija vode u akumulaciji i njena masa iznosi:

, a volumen

$$m = \frac{W_{ak.}}{gH} = 8,63 \cdot 10^8 kg$$

$$V = \frac{m}{\rho} = 863000 m^3.$$