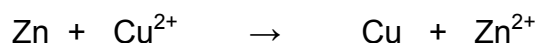


## 2. OPĆI DIO

### 2.1. Elektrokemijski izvori struje

Elektrokemijski izvori struje su uređaji koji kemijsku energiju pretvaraju u električnu putem elektrokemijskih reakcija koje se odvijaju u njima. Osnovna jedinica elektrokemijskih izvora struje je elektrokemijski članak u kojem se elektrokemijska reakcija odvija na granici faza elektroda/elektrolit. Razlika između elektrokemijskih reakcija i odgovarajućih homogenih redoks reakcija je u tome što se redoks reakcija u članku prostorno razdvaja na dvije polu-reakcije: reakciju oksidacije na anodi i reakciju redukcije na katodi. Npr. ako se cink-pločica uroni u otopinu bakrenih(II) iona doći će do redoks reakcije u kojoj će se na Zn pločici istaložiti bakar a u otopini će doći do porasta koncentracije  $Zn^{2+}$  iona:



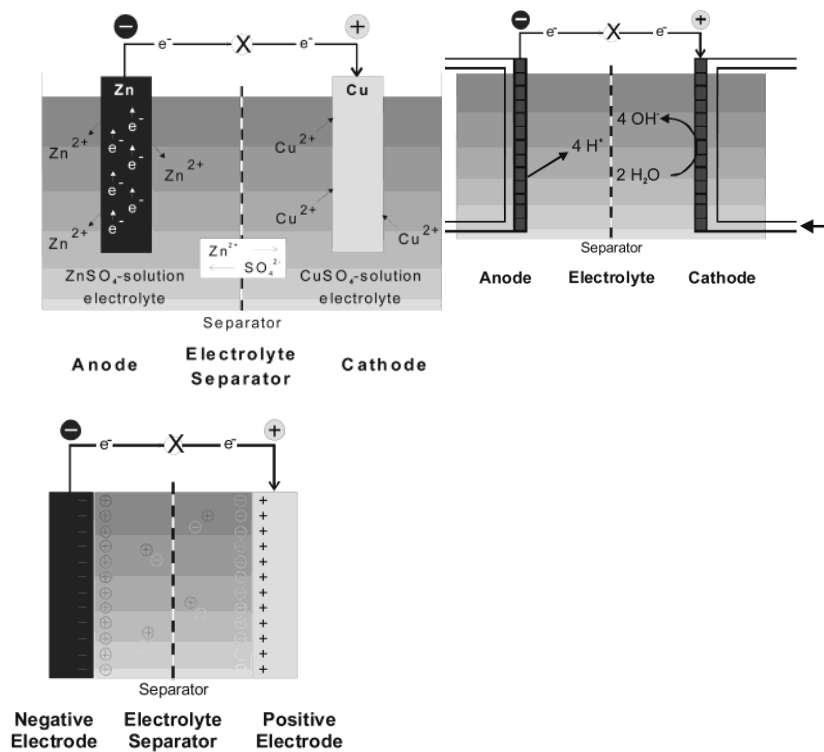
Za provedbu ove reakcije može se konstruirati elektrokemijski članak koji se sastoji od Zn elektrode uronjene u otopinu  $Zn^{2+}$  iona i Cu elektrode uronjene u otopinu  $Cu^{2+}$  iona pri čemu su dvije otopine razdvojene separatorom. Tako konstruiran članak (Daniellov članak) može se shematski prikazati na sljedeći način:



Elektromotorna sila ovog članka iznosi 1,1 V.

Svi elektrokemijski članci se sastoje od dvije elektrode (anode i katode), elektrolita i u nekim slučajevima separatora koji služi za razdvajanje anodnog i katodnog prostora.

Elektrokemijski izvori struje uključuju galvanske članke, gorivne članke te elektrokemijske kondenzatore (slika 2.1).



Slika 2.1. Shematski prikaz elektrokemijskih izvora struje: a) Daniellov članak, b) gorivni članak, c) elektrokemijski kondenzator<sup>1</sup>

Kod galvanskih i gorivnih članka odvija se pretvorba kemijske u električnu energiju putem redoks reakcija na elektrodama. Elektrokemijski kondenzatori su, za razliku, uređaji kod kojih ne dolazi do redoks reakcija na elektrodama već se energija sadržana u električnom dvosloju na granici faza elektroda/elektrolit "otpušta" u vanjski strujni krug.

### 2.1.1. Svojstva elektrokemijskih izvora struje

Idealni elektrokemijski izvor struje morao bi imati veliku gustoću energije i snage, veliki broj ciklusa punjenja i pražnjenja, dugačak radni vijek, dugačko vrijeme skladištenja, visoku energetska učinkovitost, dobra svojstva kako na visokim tako i na niskim temperaturama, biti ekološki prihvatljiv te biti jeftin.

Najčešće rabljene veličine su napon članka, specifični naboj (kapacitet članka), specifična energija i specifična snaga članka.

Napon članka,  $E$ , (elektromotorna sila članka, termodinamski napon članka) je razlika elektrodnih potencijala anode i katode u galvanskom članku. Napon članka je po svom iznosu vrlo blizak naponu otvorenog kruga,  $E_{oc}$ , koji je praktična vrijednost napona članka kad kroz njega ne teče struja. Prilikom pražnjenja članka dolazi do gubitka energije uslijed prolaska struje koji su posljedica polarizacije unutar članka. Zbog toga će radni napon,  $E_R$ , članka biti uvijek manji od napona otvorenog kruga.

Specifični naboj članka  $Q_s$ , nam kaže koliki naboj članak može dati pod određenim uvjetima pražnjenja i izražava se u  $A \cdot h \cdot g^{-1}$ . Teorijski kapacitet članka,  $Q_t$ , se može izračunati iz količine aktivnog materijala:

$$Q_t = xnF \quad (2.1)$$

gdje je  $x$  - broj molova aktivnog materijala u članku,  $n$ -broj elektrona i  $F$ - Faradayeva konstanta ( $F= 96500 \text{ Cmol}^{-1}$ ). Praktični naboj, ili samo naboj, je uvijek manji od teorijskog naboja:

$$Q = \int_0^{\infty} i dt \quad (2.2)$$

U uskoj vezi s specifičnim kapacitetom članka je i specifična energija članka koja predstavlja umnožak kapaciteta i radnog napona. Ukoliko se radni napon mijenja s vremenom pražnjenja i stupnjem ispražnjenosti članka onda je energija koju članak može dati:

$$\xi_s = i \int_0^{\infty} E dt \quad (2.3)$$

Usporedba karakteristika tipičnih kondenzatora i baterija dan je u tablici 1.

Tablica 1. Usporedba glavnih karakteristika kondenzatora i baterija

Svojstvo	Elektrolitski kondenzator	Super kondenzator od ugljičnih elektroda	Baterija
Specifična energija (Whkg <sup>-1</sup> )	<0,1	1-10	10-100
Specifična snaga (Wkg <sup>-1</sup> )	>10 000	500-10 000	<1000
Vrijeme pražnjenja	10 <sup>-6</sup> do 10 <sup>-3</sup> s	1s -1 min	0,3-3h
Vrijeme punjenja	10 <sup>-6</sup> do 10 <sup>-3</sup> s	1s – 1 min	1-5h
Djelotvornost tijekom punjenja i pražnjenja	100	85-98	70-85
Broj ciklusa	Neograničen	>500 000	~1000
Odrednice maksimalnog napona	Debljina i čvrstoća dielektrika	Područje stabilnosti potencijala	Termodinamika faznih reakcija

## 2.2 Kondenzatori

Problem kako pohraniti naboj seže još u 18. stoljeće kada se magdeburški izumitelj Otto von Guericke dosjetio trljati punu sumpornu kuglu. Leydensku staklenku, jedan od najranijih i najjednostavnijih električnih kondenzatora, izumili su, neovisno jedan od drugoga, 1745. godine nizozemski fizičar Pieter van Musschenbroek sa sveučilišta u Leydenzu i Ewald Georg von Kleist iz Pomeranije. Izvorna Leydenska staklenka bila je začepljena staklenka napunjena vodom, i sa žicom ili čavlom koji su se protezali iz čepa u vodu. Staklenka je bila nabijena tako da

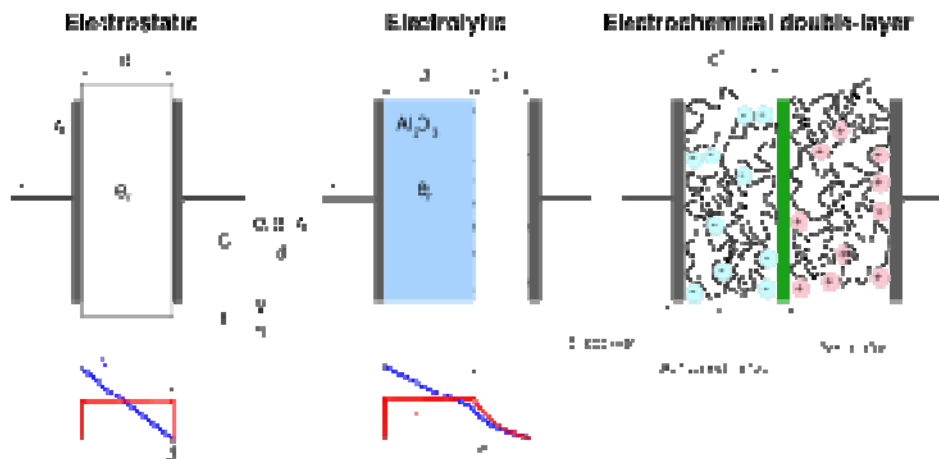
se, držeći je u jednoj ruci, vanjski dio žice dovede u kontakt s električnim uređajem. Ako je dodirnemo drugom rukom nastao bi izboj koji bi se očitovao kao nasilan šok. Današnja Leydenska staklenka je obložena alu-folijom izvana i iznutra. Električni kontakt ostvaruje se sa mjedenim štapom koji probije čep i spojen je lancem sa unutrašnjim slojem metala.



Slika 2.2 Leydenska staklenka

Kompletan izboj događa se kada su dvije aluminijske folije povezane međusobno vodičem. Njom su se mogli postići naponi i do 25000 V. Prvi pločasti kondenzator je načinio Benjamin Franklin koji je otkrio i fundamentalnu činjenicu da se umjesto staklenka mogu koristiti metalne ploče razdvojene nekim izolatorom.

Prema načinu izrade i primjene, kondenzatori se općenito mogu podijeliti na: elektrostatske, elektrolitske i elektrokemijske. (Slika2.3)



Slika 2.3 Shematski prikaz raznih vrsta kondenzatora

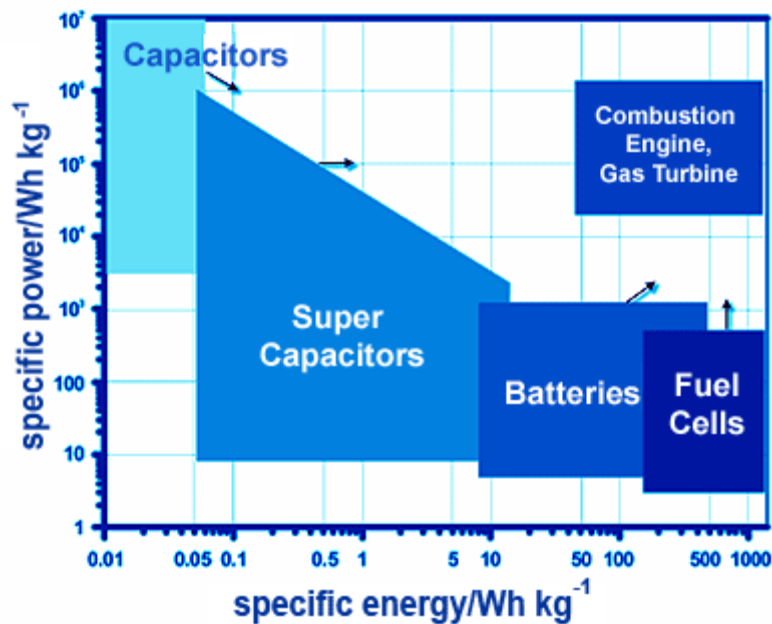
## 2.3 Elektrokemijski kondenzatori, vrste i mehanizmi pohrane naboja

Elektrokemijski kondenzatori poznati su dugi niz godina. Prvi patenti datiraju iz 1957.godine, gdje se kondenzator temelji na površini visoke razine ugljika opisane po Beckeru, ali je u toj izvedbi superkondenzator morao stalno biti uronjen u elektrolit, pa patent nikad nije zaživio. Ozbiljniji razvoj elektrokemijskih dvoslojnih kondenzatora počeo je krajem sedamdesetih godina prošlog stoljeća, u vojne svrhe za izbacivanje projektila elektromagnetskom energijom. Kasnije je razvoj bio potaknut radom na hibridnom električnom vozilu (HEV). Danas mnoge kompanije kao što su Maxwell Technologies, Siemens Matsushita, NEC, Panasonic investiraju mnogo novaca za razvoj elektrokemijskih kondenzatora.

Razlog zbog čega je u posljednje vrijeme pozornost istraživača usmjerena baš na razvoj elektrokemijskih kondenzatora može se vidjeti na slici.....na kojoj je prikazan tzv. Ragoneov dijagram koji prikazuje ovisnost jedinične snage (W/kg) i jedinične energije (Wh/kg). Na dijagramu se uočava poprilično velika "praznina" između klasičnih kondenzatora i baterija a koju popunjavaju upravo elektrokemijski kondenzatori.

U usporedbi sa konvencionalnim kondenzatorima, specifična enegija elektrokemijskih kondenzatora je za nekoliko puta veća zbog čega se i u nazivima

koriste prefiksi poput "ultra" ili "super". Nadalje, baterije i niskotemperaturne gorive ćelije su tipični uređaji male snage dok konvencionalni kondenzatori mogu imati gustoću snage  $>10^6$  W po  $\text{dm}^3$  pri vrlo niskoj gustoći energije te upravo zbog toga ,elektrokemijski kondenzatori mogu poboljšati karakteristike baterija u smislu gustoća snage ali i karakteristike klasičnog kondenzatora u pogledu energetske gustoće u kombinaciji s odgovarajućim uređajima.[2,3]



Slika 2.4 Ragone-ov dijagram – grafički prikaz ovisnosti jedinične snage i jedinične energije

Prema mehanizmu skladištenja naboja postoje dvije vrste superkondenzatora. Jedna vrsta se naziva "elektrokemijski dvoslojni kondenzator" (EDLC-electrochemical

double layer capacitor) ili kraće "elektrokemijski kondenzator" (EC-electrochemical capacitor), a u njoj se skladištenje naboja odvija putem razdvajanja električnog naboja na granici faza elektroda/elektrolit. Druga vrsta superkondenzatora su tzv. pseudokondenzatori koji skladište energiju putem elektrokemijskih reakcija na elektrodama. Kod takvih reakcija su elektrokemijske reakcije vrlo brze a karakteristike izbijanja/nabijanja su sukladne EDCL kondenzatorima pri čemu se postižu puno veći kapaciteti.

### **2.3.1 Elektrokemijski dvoslojni kondenzatori**

Kao što je prije već napomenuto, elektrokemijski dvoslojni kondenzator pohranu naboja vrši putem razdvajanja električnog naboja na granici faza elektroda /elektrolit u tzv. Helmholtzovom dvosloju.

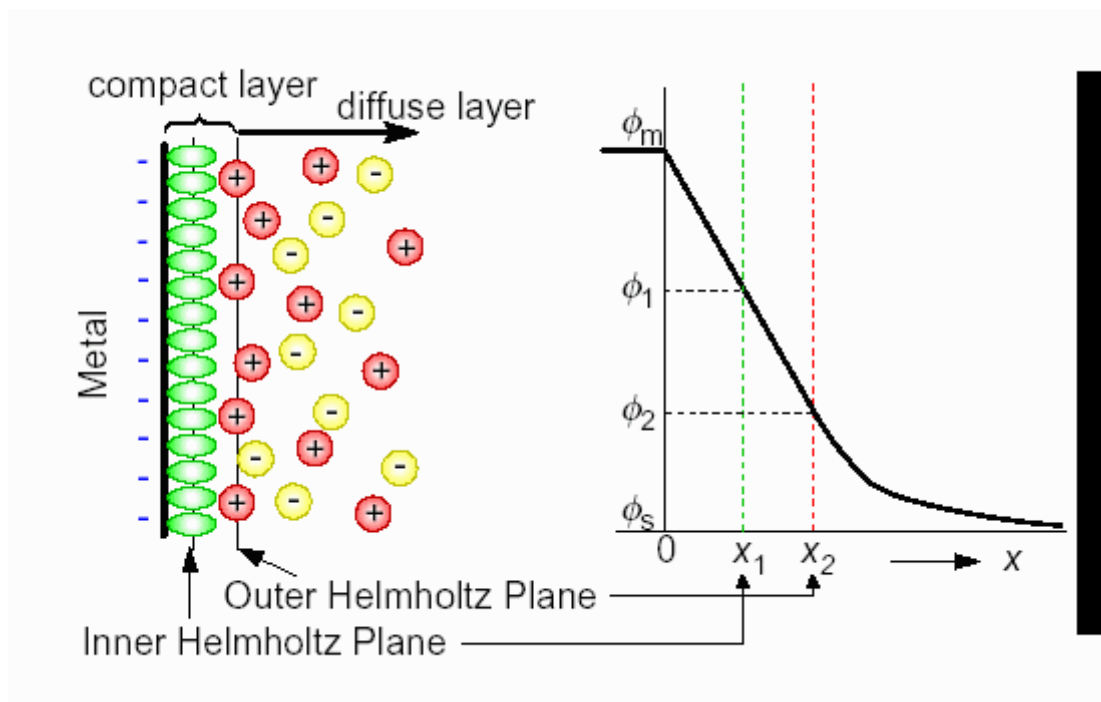
Koncept dvostrukog sloja proučavati se počeo još u 19. Stoljeću kada je von Helmholtz počeo istraživati dvostruki sloj na koloidnim česticama. Kasnije u 20. Stoljeću Gouy, Chapman i Stern su taj model proširili i nadopunili te pokazali da pri većim koncentracijama elektrolita nestaje cijeli jedan sloj koji je i dobio ime po von Helmholtzu.

Pozitivni i negativni ioni u elektrolitu nakupljaju se na površini čvrste elektrode pri čemu se kompenzira naboj na površini elektrode, odnosno pri priključku na električni izvor, naboji na elektrodama privlače iz otopine ione suprotna predznaka, te se stvaraju slojevi iona na paralelnim elektrodama.

Naime, naboj iona, koji se mogu približiti elektrodi samo na određenu udaljenost, nije po veličini jednak naboju elektrode, nego manji.

Razlika između ta dva naboja prouzročena je njihovim raspršenjem u tzv. Gouy-Chapmanovom području, tako da je ukupni kapacitet dvosloja zapravo kapacitet serijskog spoja Helmholtzova i Gouy – Chapmanova područja. To vrijedi pri niskim koncentracijama elektrolita. Pri većim koncentracijama elektrolita preostaje samo Helmholtzovo područje. (Slika 2.5 )



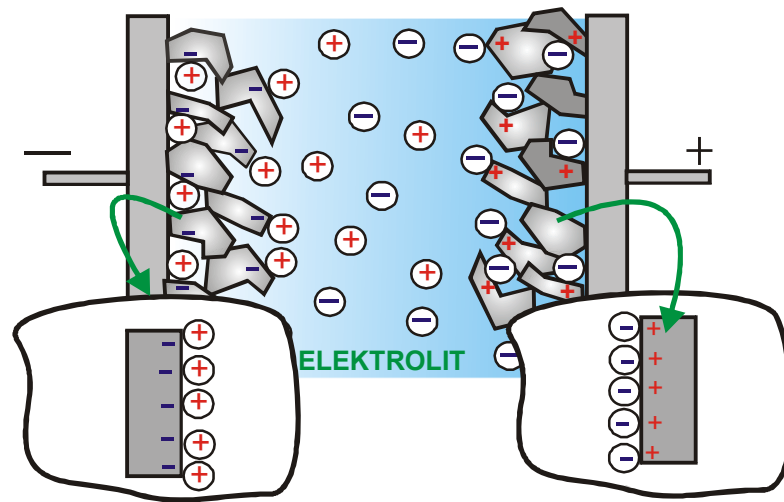


Slika 2.5 Elektrokemijski dvostruki sloj

Debljina dvosloja ovisi o koncentraciji elektrolita i veličini iona, a reda je veličine 5-10Å za koncentrirane elektrolite. Dakle, razmak između "elektroda" dvosloja je i do nekoliko tisuća puta manji od onih u suvremenim elektrostatskim i elektrolitskim kondenzatorima, pa se time postižu kapaciteti reda veličine 10-20  $\mu\text{F}/\text{cm}^2$  za glatke elektrode u koncentriranim otopinama elektrolita i njihova procjena moguća je preko relacije

$$C/A = \varepsilon_0 \varepsilon_r / d \quad (2.4)$$

gdje nam  $\varepsilon_r$  predstavlja dielektričnu konstantu,  $d$  udaljenost između elektroda a  $A$  površinu elektrode. Odgovarajuće električno polje u elektrokemijskom dvostrukom sloju je vrlo visoko čak do  $10^6$  V/cm.



Slika 2.6 Shema kondenzatora čija se pohrana naboja temelji na nabijanju i izbijanju elektrokemijskog dvosloja

U usporedbi s konvencionalnim kondenzatorima u kojima je ukupni kapacitet reda veličine pF i  $\mu\text{F}$ , kapacitet i energetska gustoća pohranjena u elektrokemijskom dvosloju prilično je visoka. [2,4]

### 2.3.2 Aktivni ugljen kao elektrodni materijal

Ugljik i njegove modifikacije najčešći su elektrodni materijal za primjenu u elektrokemijskim kondenzatorima. Razlozi za korištenje ugljika su mnogostruki, kao što su velika raspoloživost sirovina, relativno niska cijena, velika djelatna površina kao i razvijena tehnologija proizvodnje. Djelatna je površina običnog ugljičnog praška reda veličine  $100 \text{ m}^2/\text{g}$ , a onog aktivnog, ovisno o tehnologiji proizvodnje, u rasponu je od  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  do  $2500 \text{ m}^2/\text{g}$ . Osim u obliku praška, za elektrokemijske kondenzatore izrađuje se u obliku vlakana (carbon nanotube), pletiva, paste ili

tankog filma. Dodaje mu se do 20% punila (teflon, celuloza itd.) radi lakšeg rada s njime.

### 2.3.2.1 Ugljik- alotropske modifikacije i svojstva

Ugljik se pojavljuje u raznim alotropskim modifikacijama kao što su grafit, dijamant i fulereni. Razlike u svojstvima uzrokovane su različitim rasporedom ugljikovih atoma unutar kristala. Može se naći u različitim oblicima, od praška do vlakana, pjene, te u raznim kompozitima i nanocijevčicama. Dok se grafit i dijamant mogu naći u prirodi, ostali oblici mogu se dobiti samo sintetičkim putem. Zbog raznovrsnosti oblika u kojem se pojavljuje predstavlja itekako zanimljiv materijal za primjenu u raznim elektrokemijskim sustavima, posebice onima za pohranu energije, kao što je i sam kondenzator. Posljednjih godina velik se interes pokazuje za primjenu ugljika kao elektrodnog materijala zbog njegove pristupačnosti, kao i relativno niske cijene.

Privlačnost ugljika za upotrebu kao materijala za elektrode u elektrokemijskim kondenzatorima proizlazi iz kombinacije njegovih fizikalnih i kemijskih svojstava, kao što su:

- visoka vodljivost
- velika aktivna površina ( $\sim 1$  do  $2000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ )
- dobra otpornost na koroziju
- stabilnost u širokom temperaturnom rasponu
- mogućnost utjecaja na samu veličinu pora
- relativno niska cijena

Prva dva svojstva najznačajnija su za samu konstrukciju elektroda, međutim, na ta svojstva može se utjecati i time poboljšavati te razvijati elektrokemijske kondenzatore sa poboljšanim kapacitivnim svojstvima i upravo se na tome baziraju istraživanja i razvoj elektrokemijskih kondenzatora.

### 2.3.2.2 Aktivacija: proces nastajanja aktivnog ugljena

Jedna od pogodnosti ugljika, kao materijala za elektrode, jest i ta da se raznim postupcima može prevesti u formu pri čemu se mogu dobiti veći iznosi specifične površine. Taj proces nastajanja visoko poroznog ugljika nazivamo aktivacijom. Produkti procesa aktivacije obično se nazivaju , zajedničkim imenom, aktivni ugljeni. Primarna sirovina za proizvodnju aktivnog ugljena jest ugljen prirodnog podrijetla kojeg karakterizira relativno slaba poroznost i njegova se struktura sastoji od velikog broja kristala te raznih šupljina tj. međuprostora koji se nalaze u okolini pojedinog kristala. Ti međuprostori obično su ispunjeni katranom koji blokira ulaz u same pore. Proces aktivacije, osim što otvara te pore, ima mogućnost stvaranja i dodatih pora . Kontrolom uvjeta procesa aktivacije ( temperatura i plinovi) možemo utjecati na poroznost, veličinu pora tj. na samu prirodu unutrašnjih površina. Općenito se sam proces aktivacije može svrstati u dvije kategorije : termalnu aktivaciju i kemijsku aktivaciju.

Termalna aktivacija ili fizikalna aktivacija, obično se odnosi na proces koji se odvija pri temperaturama između 700 i 1100 °C u prisutnosti oksidirajućih plinova tj. vodene pare i zraka. Tijekom procesa oksidirajuća atmosfera povećava volumen pora te time i samu površinu.

Kemijska aktivacija se dešava pri nešto nižim temperaturama (~400 – 700°C) i uključuje dehidratijsko djelovanje nekih agensa poput fosforne kiseline, cinkovog klorida i kalijevog hidroksida. Materijali sa jako velikom specifičnom površinom (>2500 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>) obično su pripremljeni kemijskom aktivacijom koristeći kalijev hidroksid. [6]

### 2.3.2.3 Specifična površina i poroznost

Aktivni ugljeni imaju karakteristično veliku specifičnu površinu čija se vrijednost nalazi u području od 500 pa sve 3000 m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>. Ovako visoka vrijednost posljedica je složene mreže koja se sastoji od velikog broja međusobno povezanih pora. Međutim, veličina pora nije svugdje ista, pa tako IUPAC svrstava pore u 3 kategorije:

- mikropore ( $d < 2 \text{ nm}$ )
- mezopore ( $2 < d < 50 \text{ nm}$ )

- makropore ( $d > 50 \text{ nm}$ )

Aktivni ugljeni, pogotovo oni nastali iz ugljena prirodnog podrijetla, obično sadrže sve tri vrste pora. Pravilnim odabirom sirovine te dobro kontroliranim aktivacijskim uvjetima možemo utjecati na distribuciju tj. rasprostranjenost pojedinih pora. Materijali s vrlo velikom specifičnom površinom uglavnom sadrže mikropore. Međutim, u elektrokemijskim kondenzatorima osim poroznosti velik utjecaj na kapacitativna svojstva ima i sastav elektrolita. [5]

Studije su pokazale da mikropore veličine  $d < 0,5 \text{ nm}$  su uglavnom pristupačnije za elektro-adsorpciju malih hidratiziranih iona. Kapacitet elektroda uronjene u organski elektrolit obično pokazuje manji kapacitet nego onih u vodenom elektrolitu. Ova razlika može se objasniti većim promjerom organskog iona. Pore koje su veće od  $0,5 \text{ nm}$  mogu biti elektrokemijski dostupne u vodenim elektrolitima. S druge strane, u aprotičnom mediju, gdje nam npr. veličina iona  $\text{BF}_4^-$  u propilen-karbonatu iznosi i do  $2 \text{ nm}$  ili čak  $5 \text{ nm}$  za  $(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{N}^+$ , same pore neće imati nikakav doprinos na kapacitet elektrokemijskog dvosloja, zbog svoje nedostupnosti što dovodi do zaključka da nam pogodnost određenog elektrodnog materijala itekako ovisi o izboru samog elektrolita. Treba napomenuti da porozna struktura ugljika određuje ionsku provodnost koja se direktno odnosi na samu mobilnost iona unutar samih pora. Ta mobilnost, koja se razlikuje od one u elektrolitu, zaslužna je za određena elektrokemijska svojstva samog materijala. Očito je da je pokretljivost iona više otežana u porama manjih dimenzija nego u onim većim. Stoga, u ekvivalentnom krugu, osim samo jednog otpornika, ukupna provodljivost mora se prikazati mrežom mnogih otpora jer se otpori pojavljuju cijelom površinom samog materijala. Kao što je i prije napomenuto, električna vodljivost ugljika u uskoj je vezi sa samom morfologijom. Što je veća specifična površina, manja je veličina samih pora pa će i vodljivost biti manja. Nadalje, električna vodljivost je i limitirajući faktor za gustoću snage elektrokemijskog kondenzatora, dok za samu gustoću energije neće direktno utjecati. Pored svih fizikalnih karakteristika, pokazano je da i elektronička svojstva imaju velik utjecaj i na elektrokemijski dvosloj u samom materijalu.

S praktičkog gledišta, aktivni ugljen se sa svojim velikim udjelom velikih pora u svojoj površini, pokazao kao najpovoljniji za izradu elektroda za superkondenzatore

jer može dati visoku jediničnu snagu u relativno kratkom vremenu, te s druge strane nisku energetska gustoću. Prilikom izbora aktivnog ugljena, kao materijala za elektrode, od velike pomoći može poslužiti i elektrokemijska impedancijska spektroskopija u kombinaciji sa analizom veličine pora. Upravo ta veličina pora, koja je u odnosu sa odgovarajućim elektrokemijskim svojstvima, može se pretpostaviti usklađivanjem podataka koje smo dobili impedancijskom spektroskopijom i ekvivalentnim električnim krugom.

Uzimajući u proračun otpor  $R$  i kapacitet  $C$  određenih pora, može se dobiti vremenska konstanta u sekundama, koja pokazuje koliko brzo nam pore određene veličine mogu biti nabijene:

$$RC = (V/I) (It / V) = \tau \quad (2.5)$$

Kao npr. pore čija je veličina veća od 1.1 nm, koje predstavljaju oko 25% ukupne površine aktivnog ugljena, mogu biti elektrokemijski obrađeni u manje od 0.1 s, dok pore veličine 0.6 nm, koje predstavljaju 70% ukupne površine, mogu biti tek za 5 s. Razlika je uglavnom posljedica različite brzine difuzije elektrolita na same pore koje mogu biti različitih veličina kao i njihovih međudjelovanja. [5]

#### **2.3.2.4 Kapacitet elektrokemijskog dvosloja**

Zbog svoje velike specifične površine i karakteristične poroznosti, za aktivni ugljen mogu se očekivati i visoki kapaciteti, ako se pretpostavi da postoji proporcionalan odnos kapaciteta i specifične površine. Međutim, u mnogim slučajevima dokazan je upravo obrnuto proporcionalan odnos. Nađene su varijacije specifičnog kapaciteta u ugljičnim materijalima sa različitim morfologijom. Na iznos kapaciteta mogu utjecati i uvjeti pri kojima se vrši mjerenje kapaciteta, prisutnost pseudokapacitativnog efekta koji se može javiti, te vlažnost elektrode.

Specifični kapacitet koji se javlja u dvosloju, za razne forme ugljičnih materijala prikazan je u tablici 2. iz koje se može vidjeti utjecaj vrijednosti specifičnih kapaciteta na morfologiju ugljičnog materijala.

Tablica 2. Tipične vrijednosti kapaciteta za razne ugljične materijale

Ugljični materijal	Elektrolit	Kapacitet ( $\mu\text{Fcm}^{-2}$ )	Napomena
Aktivni ugljen	10% NaCl	19	$1200\text{m}^2\text{g}^{-1}$
Carbon Black	1M $\text{H}_2\text{SO}_4$ 31% KOH	8 10	$80 - 230\text{m}^2\text{g}^{-1}$
Ugljična vlakna	0.51 M EtNBF <sub>4</sub> u propilen karbonatu	6,9	$1630\text{m}^2\text{g}^{-1}$
Grafit (Basal plane)	0,9NaF	3	Čvrsto stanje
Grafit (prah)	10% NaCl	35	$4\text{m}^2\text{g}^{-1}$
Glassy Carbon	0,9 M NaF	~13	Čvrsto stanje
Carbon aerogel	4MKOH	23	$650\text{m}^2\text{g}^{-1}$

### 2.3.2.5 Površinske funkcionalne skupine

Visoko porozni ugljični materijali kao što je i sam aktivni ugljen gotovo uvijek na svojim površinama sadrže i određenu koncentraciju heteroatoma, uglavnom kisika i vodika te u nešto manjoj mjeri dušika, sumpora i halogena. Prisutnost heteroatoma najčešće potječe još od same pripreme materijala gdje su uslijed nepotpune karbonizacije ostali zarobljeni kemijskim vezama za površinske ugljikove atome. Osim nepotpune karbonizacije, ugljik može procesom kemisorpcije vezati molekularni kisik iz zraka. Kisik je i najznačajniji heteroatom koji je prisutan na površini aktivnog ugljena.

Tri vrste površinskih oksida može nastati na aktivnom ugljenu. Kiseli površinski oksidi nastaju kada je ugljik izložen kisiku pri temperaturama od 200 do 700°C ili reakcijama sa oksidirajućim otopinama na sobnoj temperaturi. Ove skupine obično se manje stabilne i u te skupine mogu se ubrojiti karboksilna, laktonska i fenolska. Bazični i neutralni površinski oksidi su obično stabilniji od kiselih i nastaju

na površini nakon termalne obrade, kada dođu u kontakt s kisikom. To se dešava pri nižim temperaturama. Upravo ta mjera, do koje, fizikalno adsorbirani kisik može ostati inertan, vjeruje se da ima snažan utjecaj na samu jačinu i mehanizam samopražnjenja kondenzatora. Općenito, ugljeni sa visokom koncentracijom površinskih funkcionalnih skupina, pokazuju visoke vrijednosti samopražnjenja. Uzrok tomu je tome što funkcionalne skupine koje sadrže kisik, mogu postati aktivna mjesta, koja će katalizirati elektrokemijsku oksidaciju ili redukciju ugljika, ili sam raspad elektrolitskih specija. Osim toga, prisutnost funkcionalnih skupina, može pridonijeti nestabilnosti samog kondenzatora, kao i većem ekvivalentnom serijskom otporu. [6]