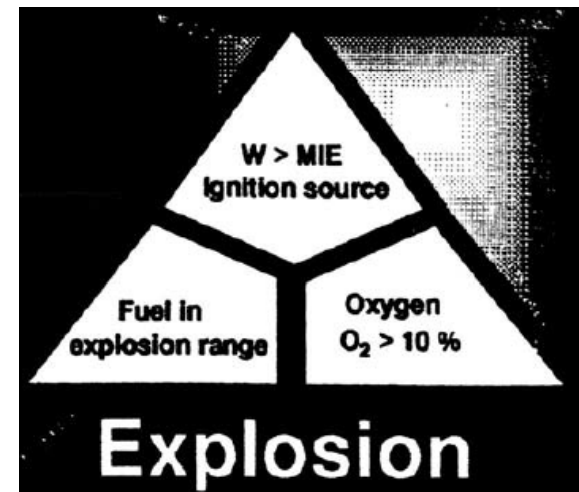
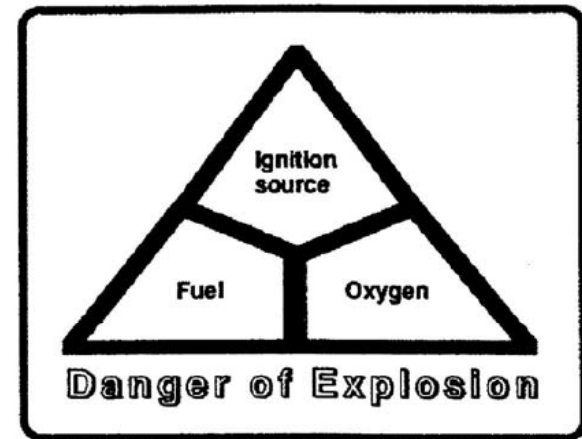


7. Elektrostaticka pražnjenja (ESD)

Uslovi za paljenje

- Za požar ili eksploziju je potrebno prisustvo
 - zapaljive supstance
 - kiseonika
 - izvora paljenja
- Njihovo prisustvo
 - nije dovoljni da dođe do eksplozije
 -
- Da bi došlo do eksplozije potrebno je da
 - smeša bude u eksplozivnim granicama
 - koncentracija kiseonika veća od 10%
 - izvor paljenja oslobodi energiju veću od MEP
- MEP je minimalna energija paljenja



Izvori paljenja

- Izazivači paljenja i eksplozije:
 - neelektrične prirode,
 - električne prirode (po pravilu su veoma opasni).
- Električni uzročnici
 - unutar električnog sistema (mreža sa električnim izvorima, potrošačima i komandno-signalnim elementima),
 - van električnog sistema (gromovi i statički elektricitet).
- Mere zaštite od eksplozije:
 - primarne: sprečavanje formiranja potencijalno eksplozivne atmosfere,
 - sekundarne: ako opasnost od eksplozije ne može biti uklonjena ili može biti samo delimično uklonjena.

Gasovi i pare zapaljivih tečnosti

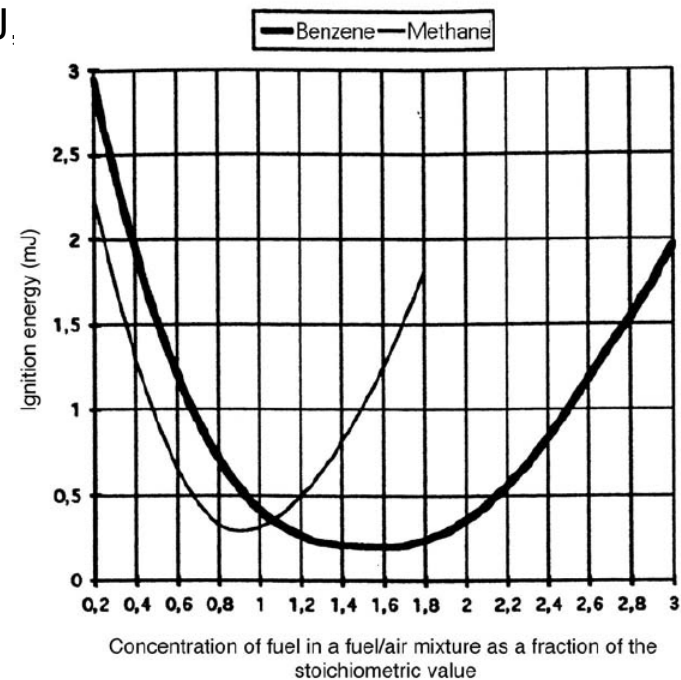
- DGE donja, GGE gornja granica eksplozivnosti
- DGE/GGE označava koncentraciju smeše ispod/iznad koje se neće stvoriti eksplozivna atmosfera
- za većinu smeša ugljovodonika i vazduha ove granice su 1%-15% zapremine
- supstance sa širokim opsegom zapaljivosti su posebno opasne



- opseg zapaljivosti se može izraziti i preko temperature paljenja (TP)
- primeri: TP za kerozin 45°C, za toluen 6°C.

Minimalna energija paljenja (MEP)

- Najmanja količina energije potrebna da izazove paljenje smeše
 - MEP od 10^{-5} J do nekoliko J
 - za ugljovodonične gasove je reda 0,25 mJ
 - prašine koje se javljaju pri proizvodnji brašna ili pri pakovanju čajeva, su izuzetno eksplozivne
- MEP se smanjuje sa
 - povećanjem temperature
 - povećanjem koncentracije kiseonika
 - povećanjem pritiska



Podela materijala

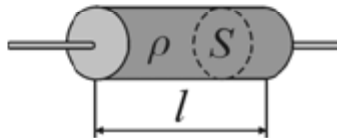
- | Materijal | $\rho [\Omega\text{m}]$ | $\sigma [\text{S/m}]$ |
|-------------|-------------------------|-----------------------|
| Provodan | $\rho < 10^2$ | $\sigma > 10^{-2}$ |
| Disipativan | $10^2 - 10^9$ | $10^{-9} - 10^{-2}$ |
| Izolator | $\rho > 10^9$ | $\sigma < 10^{-9}$ |

Materijal	$\rho [\Omega\text{m}]$	$\sigma [\text{S/m}]$
Metal (npr. bakar)	10^{-8}	10^8
Plastika (npr. PTFE)	10^{19}	10^{-19}

– Ljudsko telo se sa tačke gledišta statičkog elektriciteta ponaša kao provodnik.

- Otpornost uzorka

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

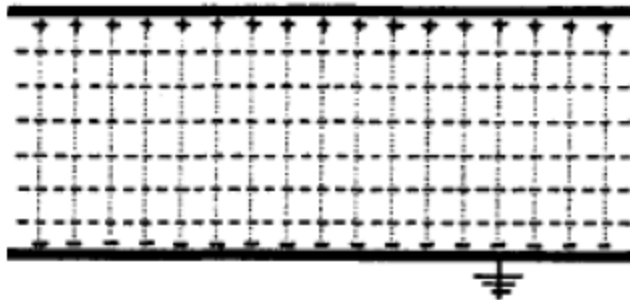


Opseg vrednosti otpornosti je veoma širok.
Otpornost čoveka je reda veličine $\text{k}\Omega$.

Raspodele naelektrisanja

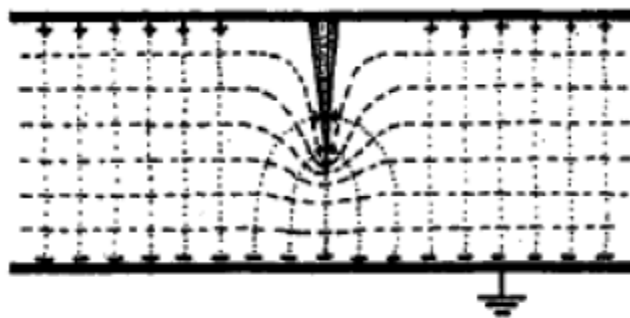
- Tačkasto naelektrisanje
- Linijsko (podužno) naelektrisanje
- Površinsko naelektrisanje
 - naelektrisanje se akumulira na površini materijala
 - javlja se na plastikama i provodnicima
- Zapreminsko naelektrisanje
 - može da postoji u dielektriku,
 - primeri: naelektrisani prah u silosima, naelektrisane tečnosti u rezervoarima, magla od naelektrisanih kapljica,
 - električno polje postoji unutar ove raspodele naelektrisanja.

Linije električnog polja / 1

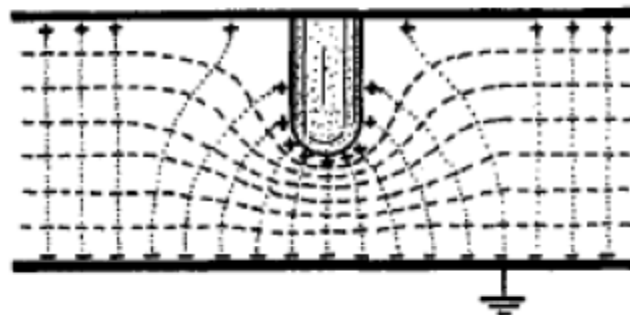


Električno polje u pločastom kondenzatoru je homogeno, $E = U/d$.

Ako se u prostor između ploča unese neki objekat, doći će do perturbacije električnog polja.

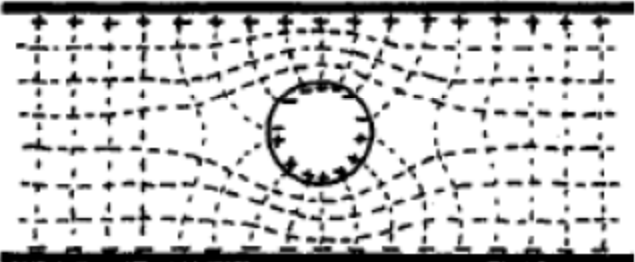
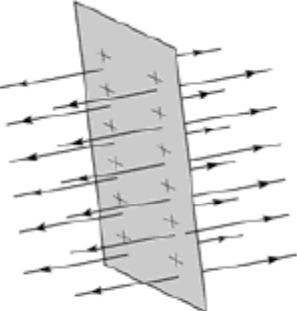
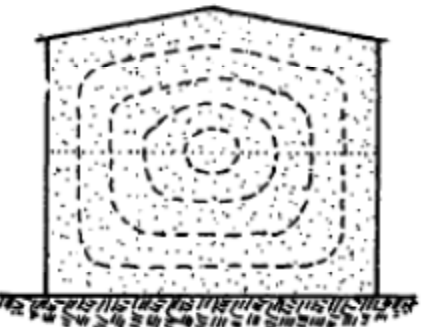


Jačina električnog polja najveća je tamo gde su linije električnog polja najgušće, u okolini vrha šiljka



u okolini zaobljenog vrha elektrode

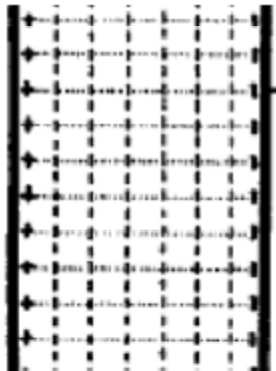
Linije električnog polja / 2

	U električno polje je uneta nenaelektrisana provodna lopta. Pod uticajem električnog polja dolazi do preraspodele naelektrisanja na provodniku.
	Naelektrisana površ dielektrika. Električno polje postoji sa obe strane naelektrisanja.
	Zapreminska raspodela naelektrisanja unutar metalnog rezervoara (npr. naelektrisane kapljice magle koja se može pojaviti nakon pranja ili tokom čišćenja parom). Električno polje je najjače u okolini centra. Metalni rezervoar je uzemljen, jer se nalazi na zemlji.

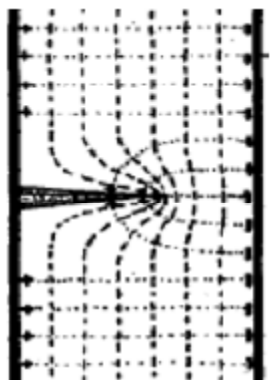
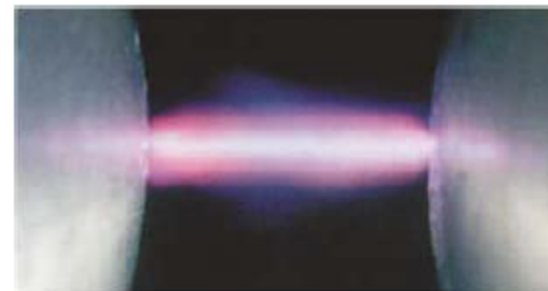
Dielektrici / 1

- Relativna permitivnost
 - pokazuje koliko puta materijal smanjuje električno polje u odnosu na polje koje bi postojalo u vakuumu
 - za vazduh je 1 (ne slabi el. polje)
 - za provodnika je beskonačna („zaustavljaju“ el. polje)
- Električna čvrstina dielektrika
 - maksimalna jačina električnog polja koju dielektrik može da izdrži i da zadrži svoja izolatorska svojstva
 - za suvi vazduh 3 MV/m
- Do proboja
 - dolazi kada jačina električnog polja dostigne električnu čvrstinu dielektrika
 - javiće se električna struja kroz plazmu
 - struja prestaje kada se električno polje smanji

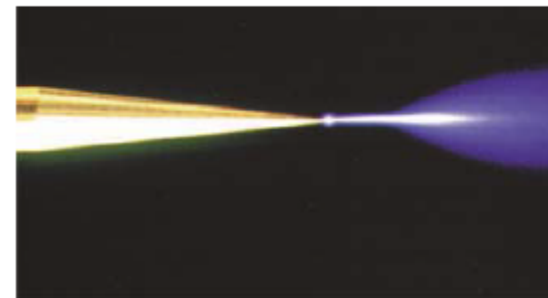
Dielektrici / 2



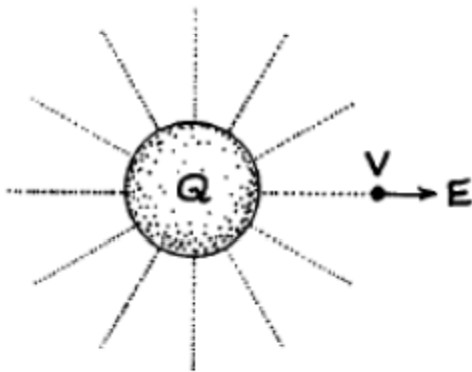
Kada el. jačina polja dostigne električnu čvrstinu dielektrika, formiraće se provodni kanal između dve ploče. Ovakvo pražnjenje naziva se varnica



Kada jačina el. polja dostigne električnu čvrstinu dielektrika, neće se formirati provodni kanal. Joni će se kretati kroz vazduh sve dok se ne neutrališu. Ovakvo pražnjenje naziva se korona.



Električno polje provodne sfere



Potencijal i jačina električnog polja izvan sfere:

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r}, \quad E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r^2},$$

E jačina električnog polja (V/m),

V potencijal (V),

Q naelektrisanje (C),

r rastojanje od centra sistema (m),

ϵ_r relativna permitivnost (neimenovan broj)

permitivnost vakuumu $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.



Preraspodela naelektrisanja u metalima traje veoma kratko. Kada je preraspodela gotova, svo naelektrisanje se nalazi na površi provodnika i električno polje unutar provodnika jednako je nuli.

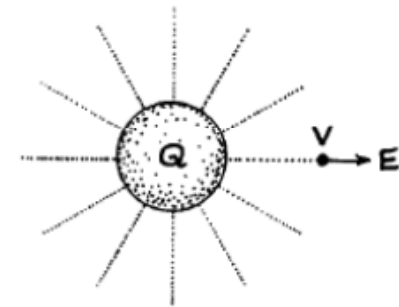
Električno polje i potencijal su najveći na površi sfere (najmanje r).

Za vazduh je $\epsilon_r \approx 1$ i prema tome $\epsilon_r\epsilon_0 = \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.

El. polje na površi provodnika / 1

- Na sferi: $\sigma = \frac{Q}{4\pi a^2}$, $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 a^2} = \frac{1}{\epsilon_r\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{4\pi a^2} = \frac{\sigma}{\epsilon_r\epsilon_0}$

odakle je $\boxed{\sigma = \epsilon_r\epsilon_0 E}$ veće σ veće E , i obrnuto



Relacija $\boxed{\sigma = \epsilon_r\epsilon_0 E}$ je opšta i važi za sve tačke na površi provodnog tela

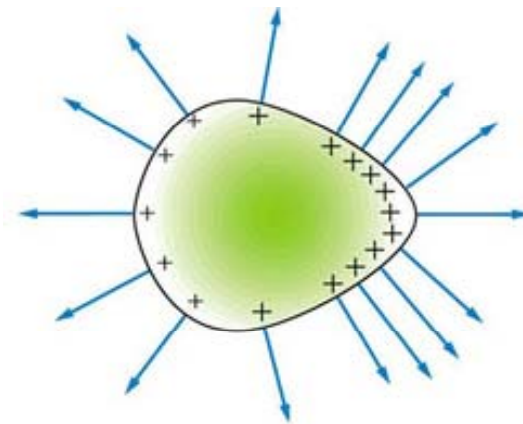
σ površinska gustina naelektrisanja (C/m^2)

ϵ_r relativna permitivnost (neimenovan broj)

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ permitivnost vakuumu

E jačina električnog polja (V/m)

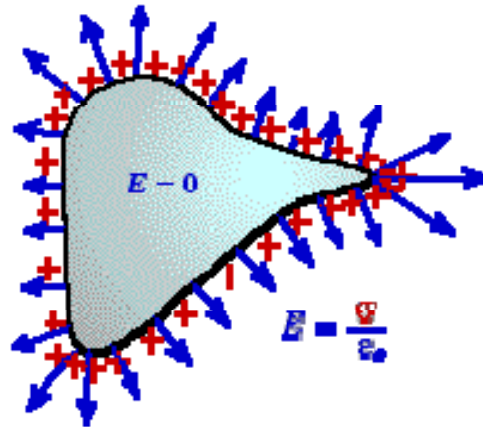
Kada je naelektrisanje akumulirano na površi tela, jačina električnog polja je najveća na samoj površi



El. polje na površi provodnika / 2

- U vazduhu je $\varepsilon_r = 1$ i

$$\sigma = \varepsilon_0 E, \quad \text{tj.} \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}.$$



- Najveća površinska gustina naelektrisanja odgovara najvećoj jačini električnog polja (električnoj čvrstini).

U vazduhu $E_{\max} = 3 \text{ MV/m}$ i

$$\sigma_{\max} = \varepsilon_0 E_{\max} = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 10^6 \approx 27 \mu\text{C/m}^2.$$

- Skoro svi ESD problemi koji se javljaju u industriji povezani su sa pojavom površinskog naelektrisanja.

Zadaci / 1

Vazduh: permitivnost $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$, električna čvrstina $E_{\text{max}} = 3 \text{ MV/m}$.

- Provodna lopta poluprečnika $a = 10 \text{ cm}$ nalazi se u vazduhu daleko od drugih tela. Odrediti maksimalno naelektrisanje koje može da postoji na lopti, kao i potencijal lopte u tom slučaju.
- Rešenje. Polje je najjače na površi lopte

$$E_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{max}}}{4\pi\varepsilon_0 a^2}$$

sledi

$$\begin{aligned} Q_{\text{max}} &= E_{\text{max}} 4\pi\varepsilon_0 a^2 \\ &= 3 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot (0,1)^2 = 3,33 \mu\text{C} \end{aligned}$$

potencijal lopte je

$$\begin{aligned} V_{\text{max}} &= \frac{Q_{\text{max}}}{4\pi\varepsilon_0 a} = E_{\text{max}} a \\ &= 3 \cdot 10^6 \cdot 0,1 = 0,3 \text{ MV} \end{aligned}$$

Zadaci / 2

- Mehur od sapunice poluprečnika $a = 1\text{cm}$ i male debljine zida nalazi se na potencijalu od 100V . Kada se mehur rasprsne, od njega se formira kapljica poluprečnika $b = 1\text{mm}$.

Odrediti naelektrisanje i potencijal kapljice.

- Rešenje. Iz potencijala mehura

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 a},$$

dobija se naelektrisanje mehura

$$Q = V 4\pi\epsilon_0 a = 100 \cdot 4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-2} = 0,11\text{nC}$$

Ista količina naelektrisanja nalaziće se i na kapljici

Potencijal kapljice je

$$V_k = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 b} = \frac{a}{b} V = 10 \cdot 100\text{V} = 1000\text{V}$$

Zadaci / 3

- Tečnost je raspršena u $N = 2200$ jednakih kapljica poluprečnika $a = 0,1\text{mm}$. Potencijal kapljica je 100V . Odrediti potencijal kapi, poluprečnika $b = 1,3\text{mm}$, koja se formira sjedinjavanjem kapljica.
- Rešenje. Iz potencijala kapljice

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 a}$$

dobija se naelektrisanje jedne kapljice,

$$Q = V 4\pi\epsilon_0 a = 100 \cdot 4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-4} = 1,11\text{pC}$$

Naelektrisanje kapi Q_k jednako je zbiru naelektrisanja svih kapljica

$$Q_k = NQ = 2200 \cdot 1,11\text{pC} = 2,44\text{nC}$$

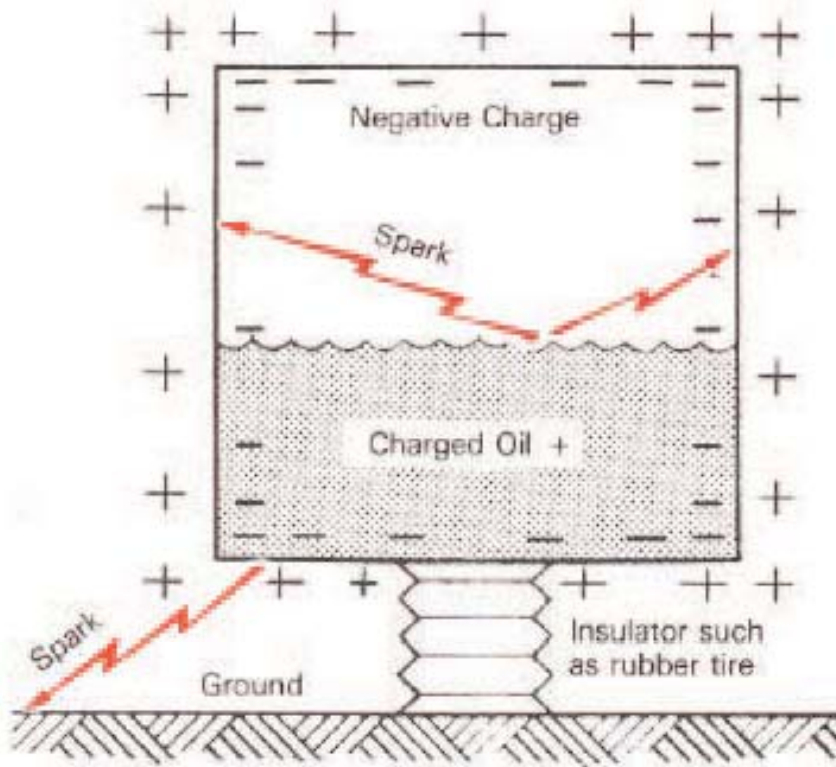
Potencijal kapi je

$$V_k = \frac{Q_k}{4\pi\epsilon_0 b} = \frac{Na}{b} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 a} = 169 \cdot 100\text{V} = 16,9\text{kV}$$

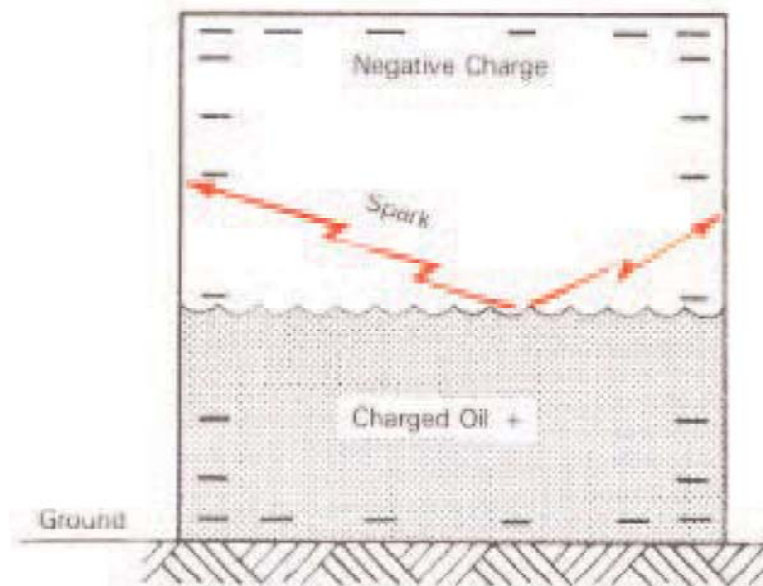
Uzemljivanje i povezivanje

 GROUNDED	Kada između provodnog objekta i zemlje postoji provodni put kaže se da je provodni objekat uzemljen. Varnica se ne može pojaviti između dva uzemljena provodna objekta.
 BONDED	Provodni objekti su povezani ako između njih postoji provodni put. U ovom slučaju provodni objekti su na istom potencijalu (koji u opštem slučaju nije jednak potencijalu zemlje). Između povezanih provodnih objekata ne može se pojaviti varnica. Međutim može se pojaviti varnica između provodnih objekata i zemlje.
 GROUNDED and BONDED	Da bi se izbegla pojava varnice, provodni objekti se povezuju i uzemljuju. Međutim, uzemljivanje rezervoara ne može sprečiti akumulaciju naelektrisanja na slabo provodnoj tečnosti u rezervoaru.

Primer: uzemljivanje rezervoara



- dve opasnosti

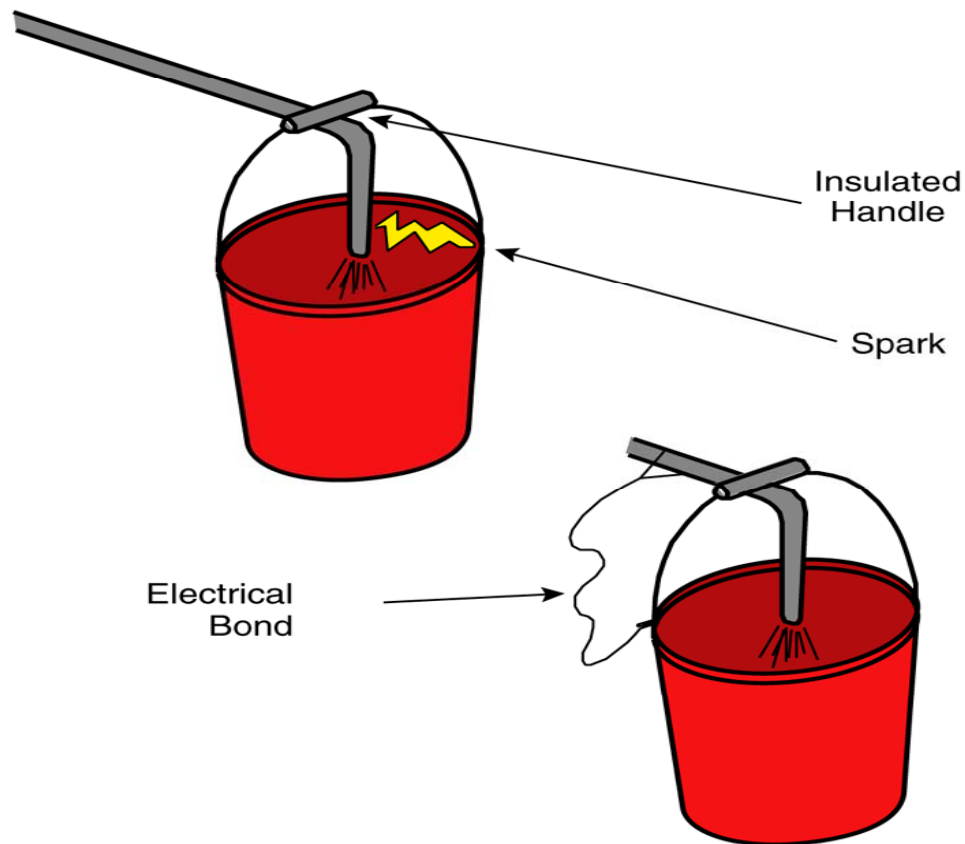


jedna opasnost

Antistatička odeća i obuća

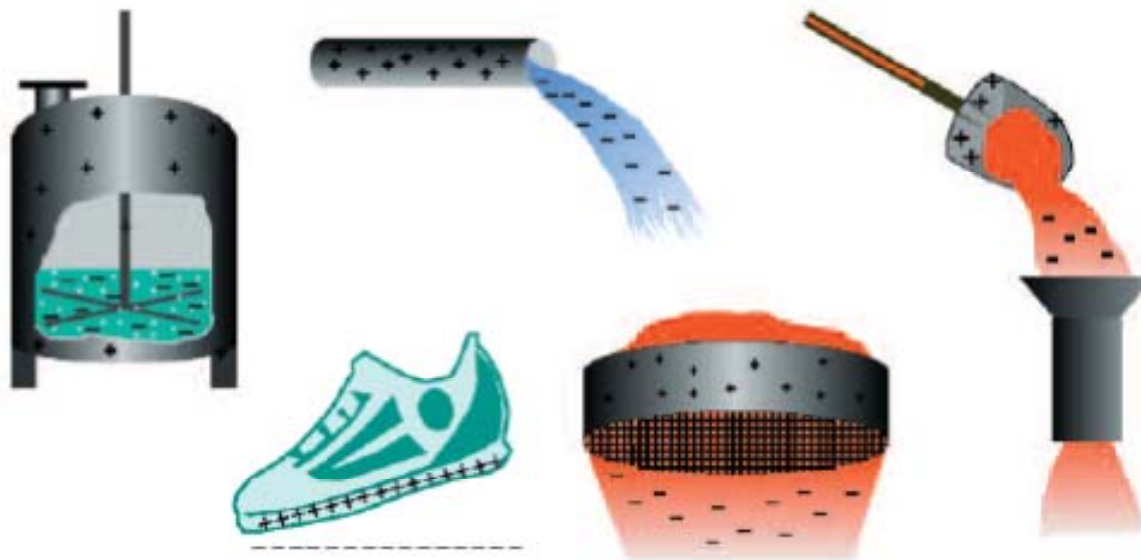


Primer: povezivanje pri uzorkovanju

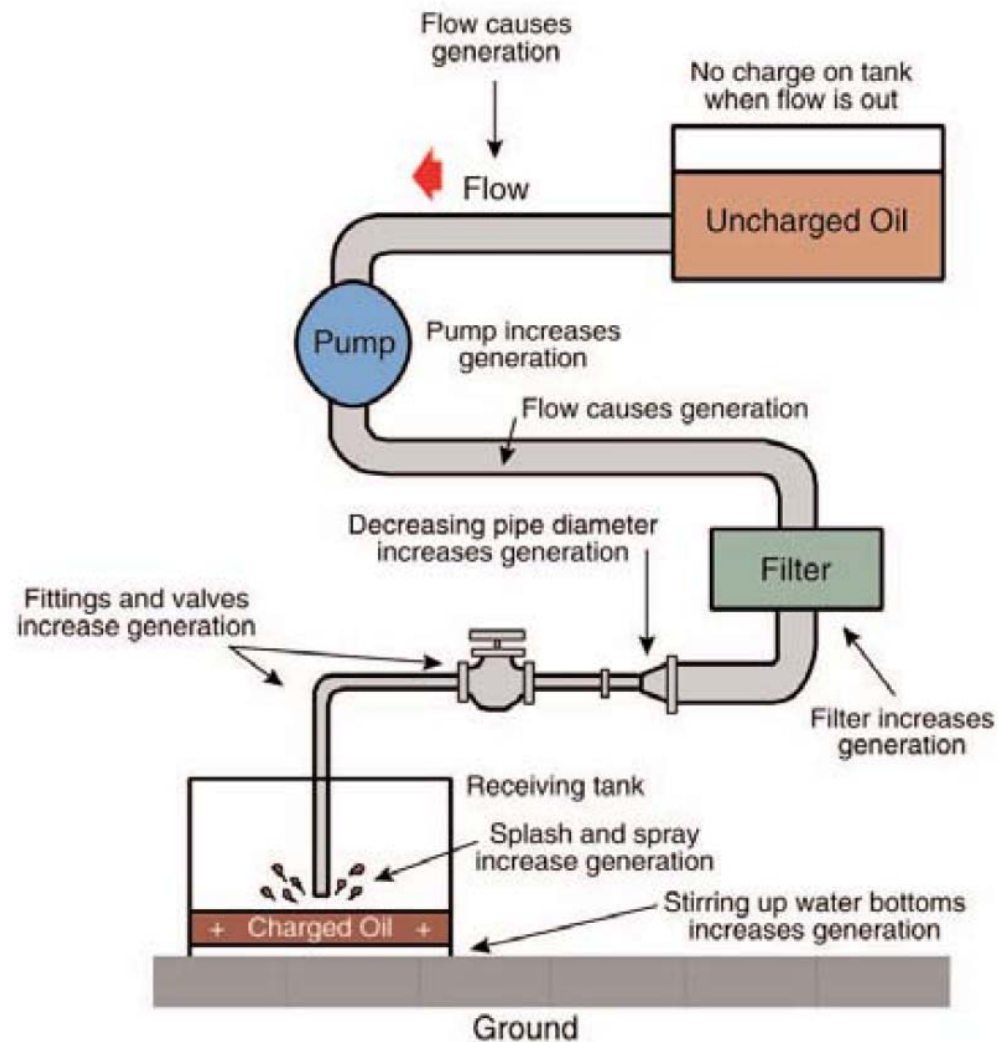
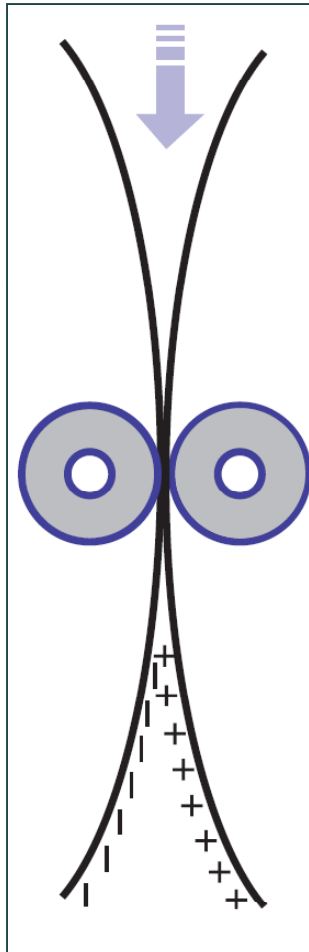


Statički elektricitet

- može se nagomilati na predmetima, ljudima, u oblacima prašine ili dima
- javlja se u mnogim industrijskim procesima (samo u nekim se koristi)
- može biti uzrok eksplozije ili požara
- Istovremeno sa razdvajanjem naelektrisanja dešava se i njihovo razilaženje
- Ako je brzina razdvajanja veća od brzine razilaženja dolazi do akumulacije naelektrisanja



Razdvajanje naelektrisanja - primeri



Razdvajanje naelektrisanja

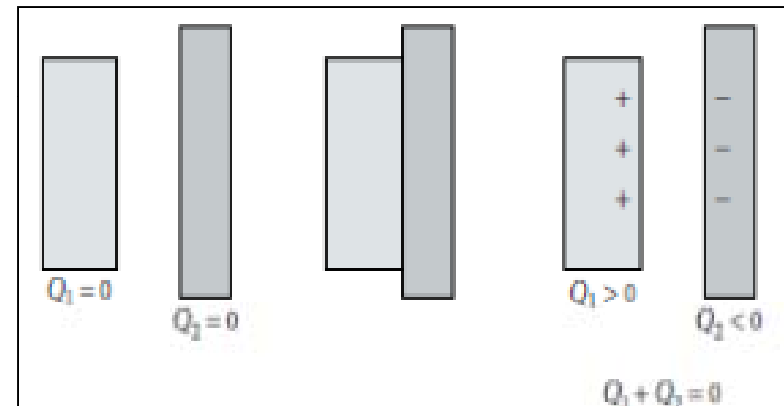
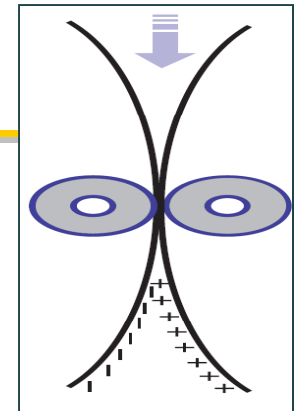
- dolazi usled
 - dodira i trenja (dva izolatora ili izolator i provodnik)
 - formiranja dvostrukog sloja naelektrisanja (pri proticanju tečnosti kroz cevi)
 - elektrostatičke indukcije (provodnik u električnom polju)
 - prenosom naelektrisanja (dodir provodnih tela)
 - naelektrisavanje uz pomoć korone (valjak fotokopir mašine, jonizacija vazduha)
- Mehanizmi su isprepletani
- Faktori koji utiču na količinu naelektrisanja
 - tip materijala - različite sklonosti ka naelektrisavanju (plastike su sklone naelektrisavanju)
 - uslovi okoline - vlažnost vazduha, temperatura (npr. hlađenjem materijali postaju skloniji naelektrisavanju)
 - ponavljanje - dovodi do većeg naelektrisavanja (npr. materijal se kreće po nizu valjaka)



i) dodir i trenje

- dolazi do prelaska naelektrisanja sa jednog tela na drugo
- pri trenju se javljaju veće vrednosti površinskog naelektrisanja
- dva izolatora, ili izolator i provodnik

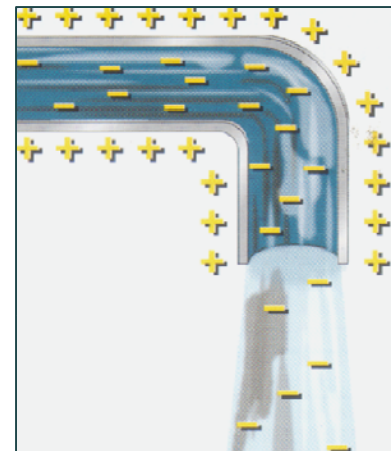
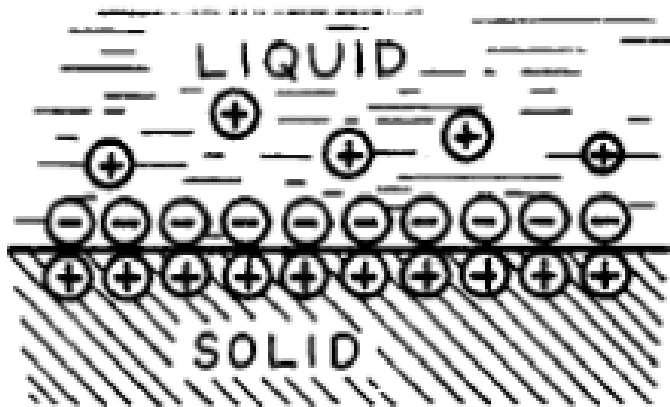
- dva čvrsta tela
- čvrsto telo i tečnost
- dve tečnosti
- tečnost i gas
- ne dešava u gasovima



- Nakon razdvajanja
 - na izolatoru naelektrisanje ostaje na površi koja je naelektrisana dodirom
 - kod provodnika višak naelektrisanja se raspoređuje po površi celog tela
- Do pražnjenja može doći
 - prilikom razdvajanja materijala, uklanjanjem naelektrisanog praha itd.

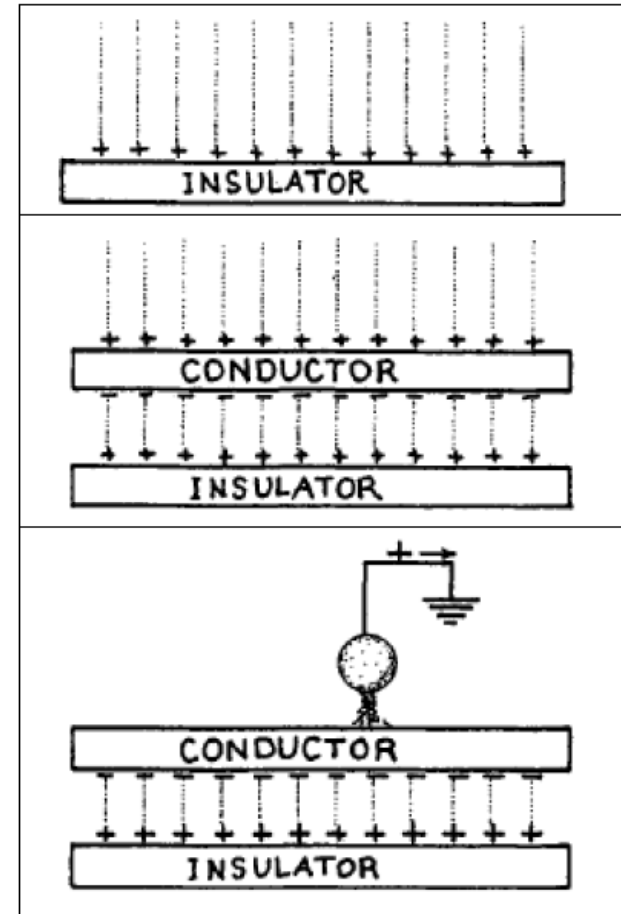
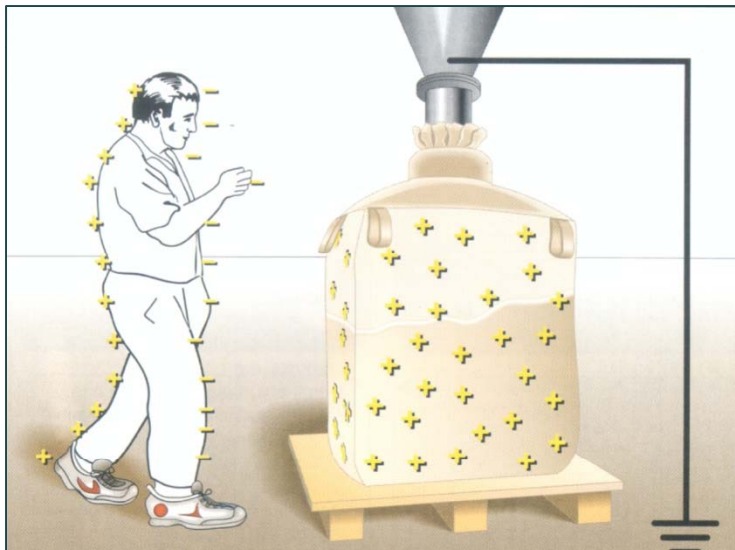
ii) dvostruki sloj naelektrisanja

- javlja se na površini tečnosti
 - čvrsto telo-tečnost, tečnost-tečnost ili gas-tečnost
 - formiraju se dva sloja naelektrisanja suprotnog znaka
 - sloj uz dodirnu površinu miruje, drugi sloj se kreće ako se tečnost kreće (javlja se tzv. struja toka, struja je veća kada je brzina protoka veća)

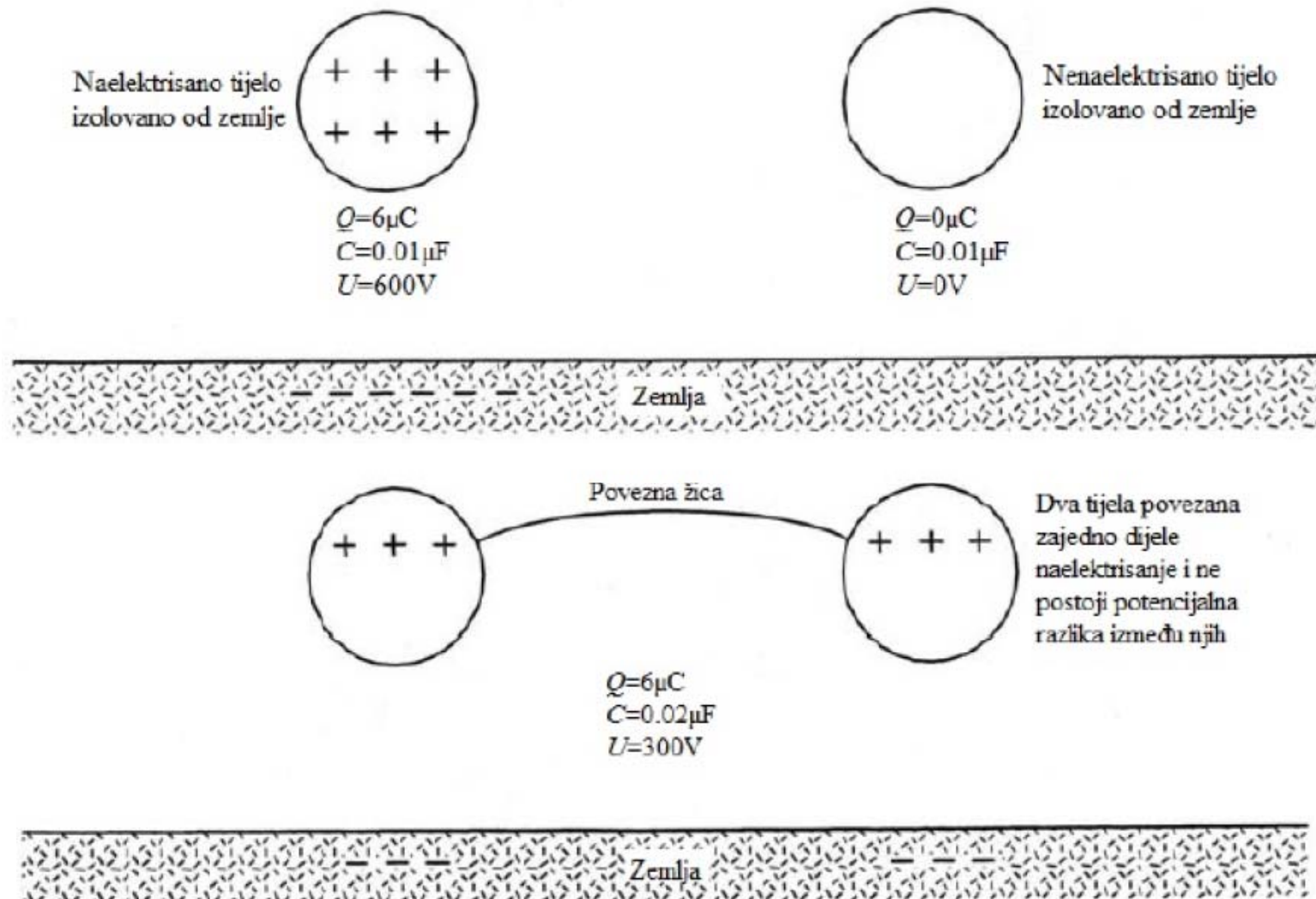


iii) elektrostatička indukcija / 1

- u električnom polju dolazi do razdvajanja naelektrisanja na provodniku (ljudsko telo se ponaša kao provodnik)



iv) prenos naelektrisanja



Klasifikacija ESD

- elektrostatička pražnjenja (ESD)
- do pražnjenja dolazi kada jačina el. polja dostigne električnu čvrstinu dielektrika
- Klasifikacija ESD je empirijska:
 - korona
 - četkasto pražnjenje
 - konusno pražnjenje
 - razgranato četkasto pražnjenje
 - varnica
 - munja
- Korona i četkasta pražnjenja
 - javljaju se u prisustvu jedne elektrode
- Varnica i munja
 - su pražnjenje između dve elektrode

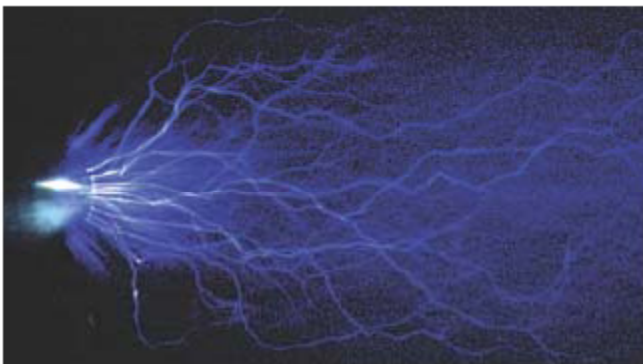
Primeri ESD



Primer elektrostatičke varnice.



Primer korone.



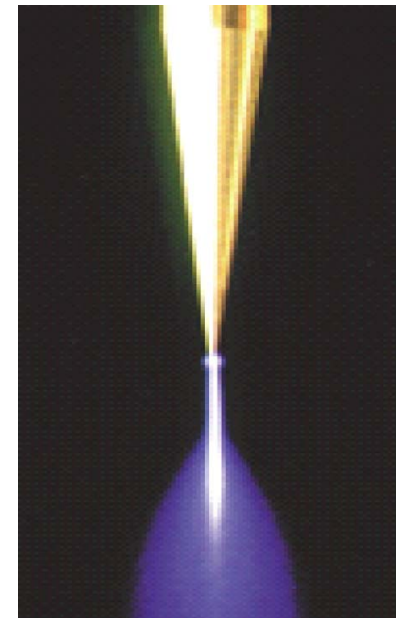
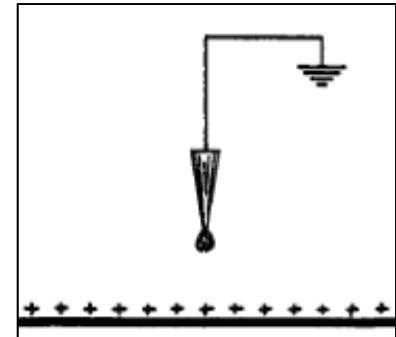
Primer četkastog pražnjenja.



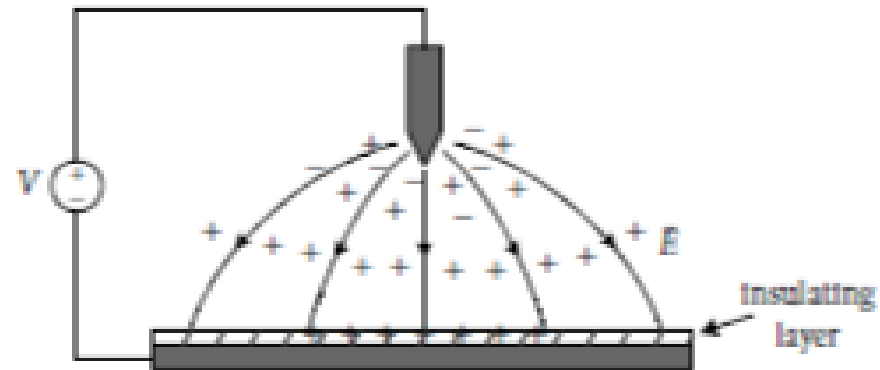
Primer razgranatog četkastog pražnjenja.

Korona

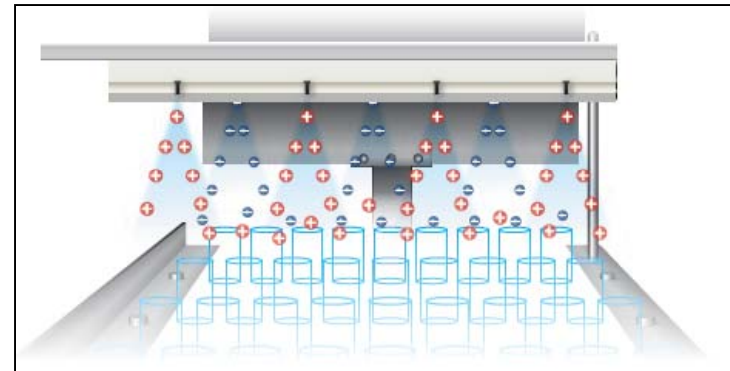
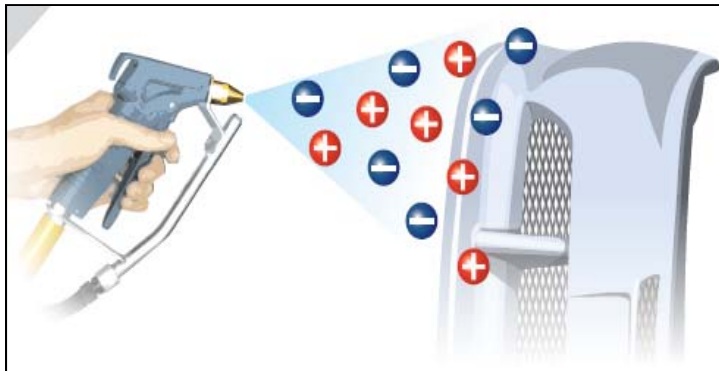
- pojavljuje se u okolini šiljka
 - joni se javljaju samo u okolini šiljka i neće se formirati provodni kanal
 - završava negde u prostoru
 - praćena je slabim osvetljenjem
 - javlja se i u okolini provodnika na visokom potencijalu (npr. u okolini dalekovoda)
- pražnjenje male energije
 - manje od MEP za većinu materijala (osim za vodonik i CS_2).



Primena korone

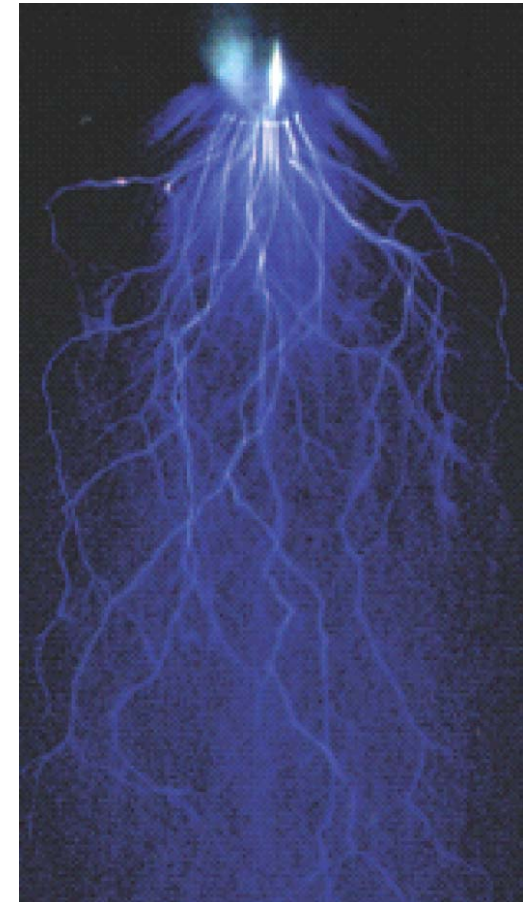
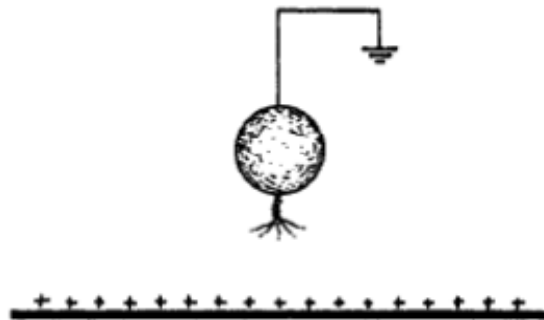


- za uklanjanje statičkog naelektrisanja sa papira, tkanine ili plastike
- električna sila: $F = QE$
- jonizatori: pasivni i aktivni (priključeni na izvor napona 5-10 kV)



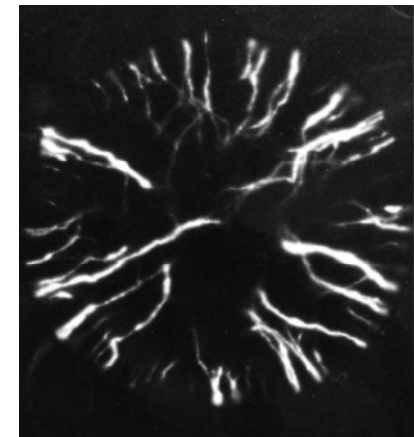
Četkasto pražnjenje

- javlja se na zakrivljenoj površini elektrode
- završava negde u prostoru (kao i korona)
- prelaz sa korone do četkastog pražnjenja ide sa prelaskom od oštre ka zaobljenoj elektrodi
- ekvivalentna energija pražnjenja: 1-4 mJ
- sa povećanjem poluprečnika zakrivljenosti elektrode pri pražnjenju se oslobađa više energije



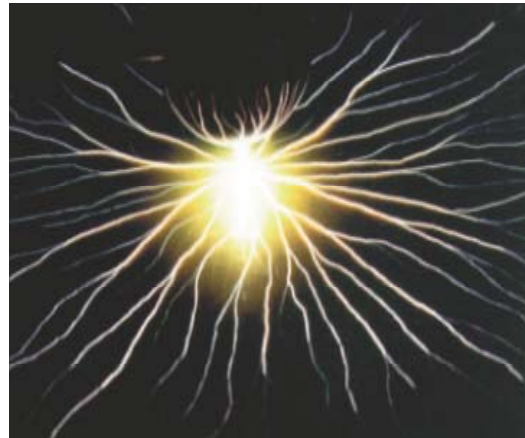
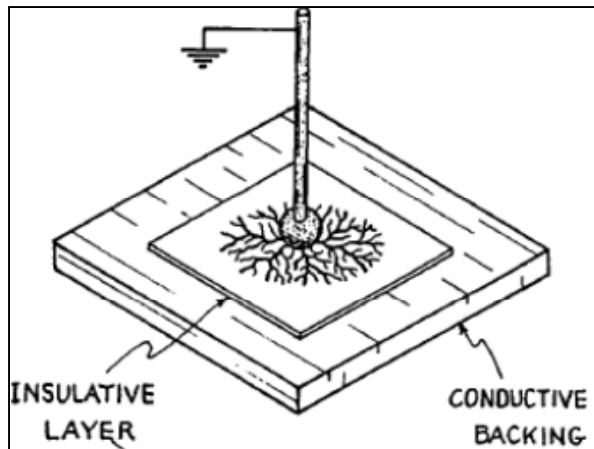
Konusno pražnjenje

- na konusnoj površi velike količine rasutog materijala
- pri skladištenju granula od izolacionog materijala dolazi do sabijanja materijala (i naelektrisanja)
- povećava se površinska gustina naelektrisanja
- ekvivalentna energija pražnjenja do 20 mJ
- veće granule mogu da oslobode veću energiju



Razgranato četkasto pražnjenje / 1

- javlja se na površini izolatora oslonjenog na uzemljeni provodnik
 - ekstremno velika gustine naelektrisanja na izolatoru (reda $250\mu\text{C}/\text{m}^2$)
 - debljina izolatora manja od 8 mm
 - ekvivalentna energija pražnjenja je tipično 1J (može biti i veća)
 - uzrokuje paljenje bilo koje zapaljive smeše



Razgranato četrkasto pražnjenje / 2

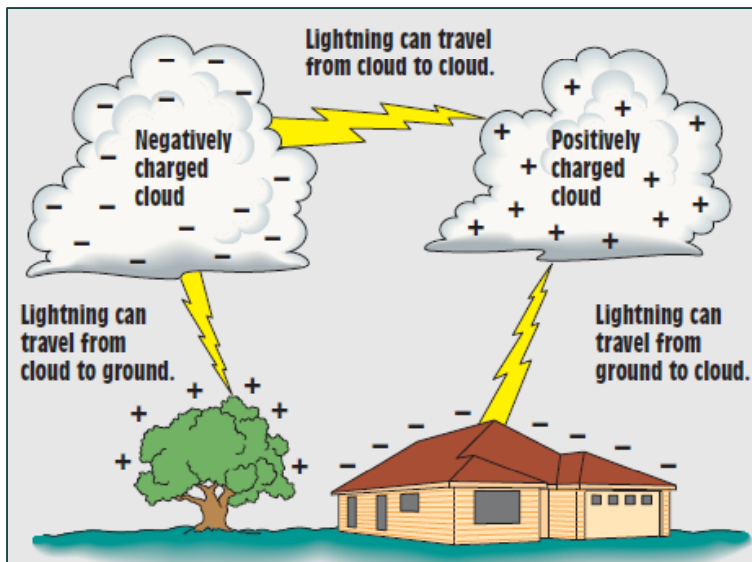
- na plastičnoj cevi
sa dizel gorivom



- Mere za sprečavanje razgranatog četkastog pražnjenja:
 - debljina izolatora veća od 10 mm
 - povećanje specifične provodnosti dielektrika
 - smanjenje električne čvrstine dielektrika tako da do proboja dođe pre nego što se stvore uslovi za razgranato četkasto pražnjenje (npr. fina perforacija džakova)

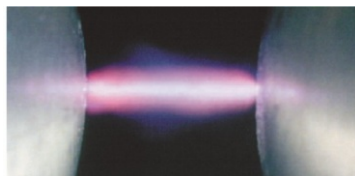
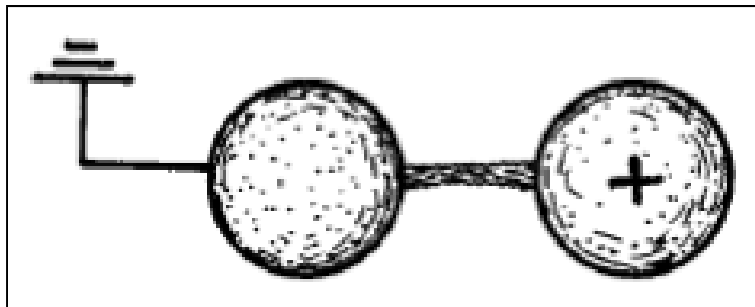
Munja

- može se javiti
 - između dva oblaka, u oblaku ili između oblaka i zemlje
 - primećena je i u oblacima prašine pri vulkanskoj erupciji
- neće se javiti
 - u zapreminama manjim od 60 m^3
 - u cilindričnim kontejnerima prečnika manjeg od 3m (bez obzira na visinu)



Varnica / 1

- javlja se između dva provodna objekta (ljudi, mašina, proizvoda)
 - jedan objekat se nalazi na visokom potencijalu, a drugi na mnogo nižem potencijalu (ili je uzemljen)
 - kritična vrednost električnog polja može se pojaviti zbog smanjenja rastojanja između tela ili povećanjem napona ($E = U/d$, $Q = CU$)



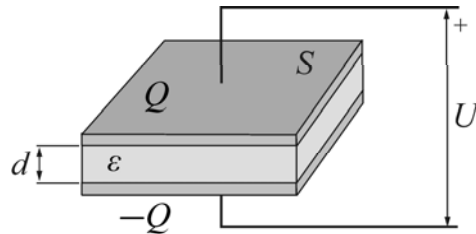
Procena energije varnice / 1

- $Q = CU$

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

$$W = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{Q^2}{2C}$$

W se koristi za procenu energije varnice.



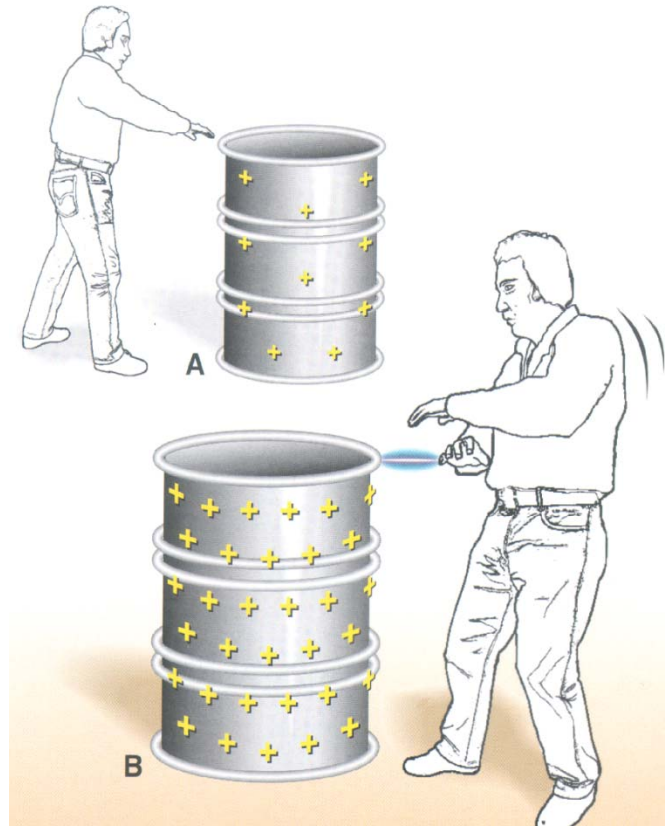
- Primer.

Potencijal čoveka kapacitivnosti 200pF je 10kV

Naelektrisanje na čoveku je $Q = CV = 2\mu\text{C}$

Energija uskladištena u čoveku je

$$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot (10^4)^2 = 10^{-2} \text{ J} = 10 \text{ mJ}$$



Procena energije varnice / 2

- Potencijal sfere: $V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 a}$
- Kapacitivnost: $C = \frac{Q}{V} = 4\pi\epsilon_r\epsilon_0 a$

U vazduhu ($\epsilon_r = 1$) i $4\pi\epsilon_r\epsilon_0 = 111 \cdot 10^{-12} \approx 10^{-10}$

$$\boxed{C \approx a \cdot 10^{-10}}$$

$$a = 1\text{cm} \text{ i } C = 1\text{pF}$$

$$a = 10\text{cm} \text{ i } C = 10\text{pF}$$

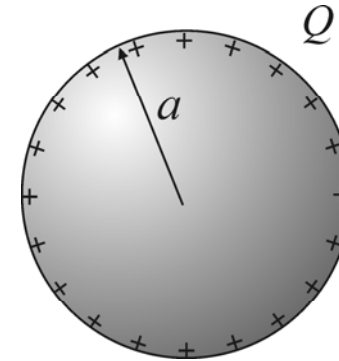
$$a = k\text{cm} \text{ i } C = k\text{pF}$$

Primeri:

metalno bure na podlozi od izolatora $C = 200 - 400\text{pF}$

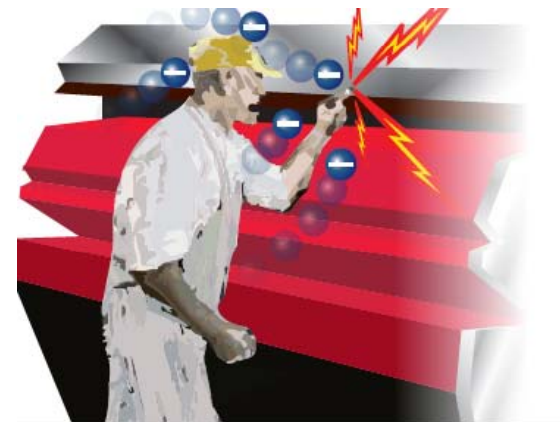
vozilo sa gumama na izolatoru $C = 500 - 1000\text{pF}$

metalni poklopac na plastičnim ili staklenim cevima $C = 10 - 30\text{pF}$



Varnica sa ljudskog tela / 1

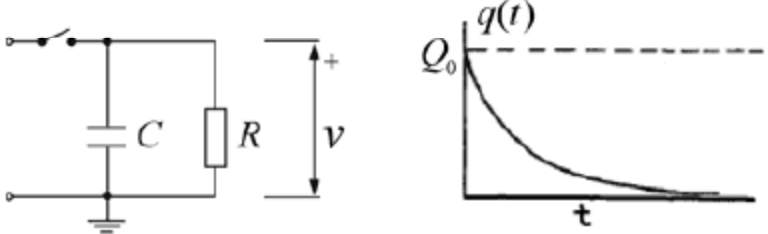
- Ljudi se mogu naelektrisati
 - razdvajanjem različitih materijala
 - elektrostatičkom indukcijom
- Do pojave varnice može doći
 - kada su ljudi izolovani od zemlje
 - u blizini uzemljenog provodnog tela
 - ljudsko telo može uskladištiti mnogo više energije od MEP mnogih zapaljivih smeša
 - tipične energije varnica: od μJ do nekoliko mJ
 - varnica od
 - 1 mJ se može osetiti
 - 10 mJ se oseća kao ubod
 - 100 mJ se oseća kao slabi udar



Varnica sa ljudskog tela / 2

- energije pražnjenja od nekoliko mJ mogu biti indirektna opasnost usled nenamernih pokreta
 - pražnjenje statičkog elektriciteta može izazvati i električni udar
 - ovaj udar razlikuje se od drugih električnih udara po tome što je kratkog trajanja
 - opasni nivoi ovih udara izraženi su preko energije ili naelektrisanja (a ne struje)
 - opasnost po zdravlje ako energija pražnjenju prelazi 350 mJ ili preneto naelektrisanje prelazi 50 μC
 - četkasta pražnjenja i varnice sa malih objekata nisu opasni po zdravlje
 - energija varnica sa velikih objekata i razgranata četkasta pražnjenja $>1\text{J}$
- Mere
 - smanjenje akumulacije naelektrisanja na ljudima i sigurna pražnjenja
 - antistatička odeća i obuća
 - uklanjanje naelektrisanja pre ulaska u zonu opasnosti

Razilaženje naelektrisanja / 1

	Ako se provodno telo uzemlji, električno kolo koje modeluje razilaženje naelektrisanja prikazano je na slici. Naelektrisanje opada po eksponencijalnom zakonu $q(t) = Q_0 e^{-t/\tau}$ $q(t)$ naelektrisanje u trenutku t (C), Q_0 naelektrisanje u početnom trenutku (C), t vreme (s), τ vreme relaksacije (s).												
$\tau = RC$ $\tau \equiv$ Time constant, s $R \equiv$ Resistance, Ω $C \equiv$ Capacitance, F	Naelektrisanje na provodnom telu će se lako razići ako postoji provodni put prema zemlji (malo R). Ako tog provodnog puta nema (veliko R), vreme potrebno da se naelektrisanje razide je više redova veličine veće.												
<table border="1" data-bbox="428 1066 829 1385"> <thead> <tr> <th>Time Constants</th><th>Charge Remaining</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td><td>0.368</td></tr> <tr> <td>2</td><td>0.135</td></tr> <tr> <td>3</td><td>0.050</td></tr> <tr> <td>4</td><td>0.018</td></tr> <tr> <td>5</td><td>0.007</td></tr> </tbody> </table>	Time Constants	Charge Remaining	1	0.368	2	0.135	3	0.050	4	0.018	5	0.007	Nakon vremena τ naelektrisanje opadne na 0,368 (1/e) početne vrednosti (pamtiti kao malo više od 1/3). Nakon 3τ može se smatrati da je naelektrisanje praktično iščezlo (5%), a nakon 5τ da je potpuno iščezlo (<1%).
Time Constants	Charge Remaining												
1	0.368												
2	0.135												
3	0.050												
4	0.018												
5	0.007												

Razilaženje naelektrisanja / 2

- Primer. Potencijal osobe u početnom trenutku je $V_0 = 3\text{ kV}$.
Kapacitivnost osobe je $C = 200\text{ pF}$, otpornost prema zemlji $R = 10^{11}\Omega$.

- Naelektrisanje u početnom trenutku

$$Q_0 = CV_0 = 200 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 10^3 \text{ C} = 600 \cdot 10^{-9} \text{ C} = 0,6 \mu\text{C}.$$

$$\tau = RC = 10^{11} \cdot 200 \cdot 10^{-12} \text{ s} = 20 \text{ s}.$$

$$q(\tau) = 0,368 \cdot Q_0 = 0,22 \mu\text{C},$$

$$v(\tau) = 0,368 \cdot V_0 = 0,368 \cdot 3000 \text{ V} = 1100 \text{ V}.$$

$$q(3\tau) = 0,050 \cdot 0,6 \mu\text{C} = 0,03 \mu\text{C},$$

$$v(3\tau) = 0,050 \cdot 3000 \text{ V} = 150 \text{ V}.$$

$$q(5\tau) = 0,007 \cdot 0,6 \mu\text{C} = 0,004 \mu\text{C},$$

$$v(5\tau) = 0,007 \cdot 3000 \text{ V} = 21 \text{ V}.$$

Time Constants	Charge Remaining
1	0.368
2	0.135
3	0.050
4	0.018
5	0.007

Razilaženje naelektrisanja / 3

Vreme relaksacije u dielektriku $\tau = \rho \varepsilon_r \varepsilon_0 = \frac{1}{\sigma} \varepsilon_r \varepsilon_0$ τ vreme relaksacije (s), ρ specifična otpornost (Ωm), σ specifična provodnost (S/m) ε_r relativna permitivnost (neimenovan broj), $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m permitivnost vakuuma.	Ako je sredina loš provodnik, naelektrisanje ce ne može lako pazići.
--	---

- Pleksiglas: $\rho = 10^{13} \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 3,4$

$$\tau = \rho \varepsilon_r \varepsilon_0 = 10^{13} \cdot 3,4 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ s} = 300 \text{ s}$$

Na τ utiče i ε_r . Za $\varepsilon_r = 6,8$ dobilo bi se $\tau = 600 \text{ s}$.

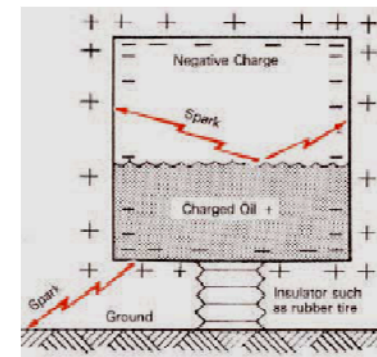
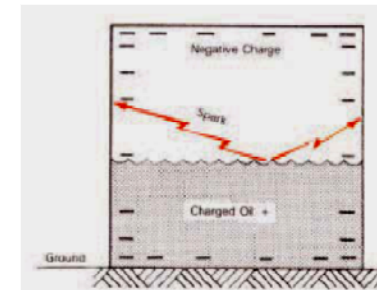
Tečni ugljovodoni: $\sigma = 1 \text{ pS/m}$, $\varepsilon_r = 2,3$

$$\tau = \frac{1}{\sigma} \varepsilon_r \varepsilon_0 = \frac{2,3 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12}}{10^{-12}} = 2,3 \cdot 8,854 = 20 \text{ s}$$

Za tečnosti se smatra da je 100s dovoljno da se naelektrisanje razide.

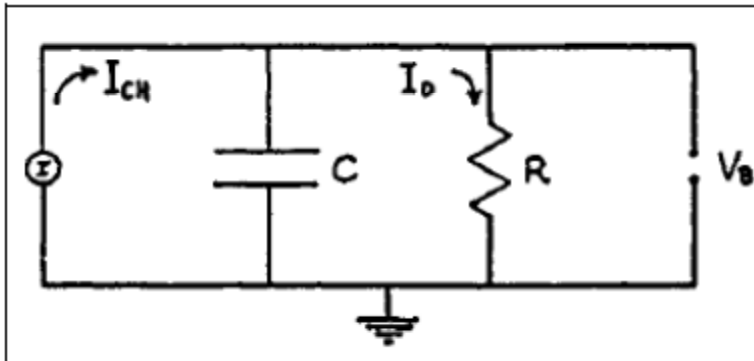
Razilaženje naelektrisanja / 4

- Tečnosti
 - provodne $\sigma > 1000$ pS/m
 - disipativne 50 pS/m – 1000 pS/m
 - neprovodne $\sigma < 50$ pS/m
 - npr. dizel gorivo 0,5 – 50 pS/m, benzin 10 – 3000 pS/m, sirova nafta > 1000 pS/m
- Uzemljen rezervoar
 - brzina razilaženja naelektrisanja zavisi od σ tečnosti
 - ako je $\sigma > 50$ pS/m neće doći do akumulacije naelektrisanja (sa stanovišta elektrostatičke opasnosti tečnost se smatra sigurnom)
- Rezervoar od izolatora (npr. plastike) ili provodan ali nije uzemljen
 - do akumulacije naelektrisanja dolazi bez obzira na σ tečnosti



Akumulacija / 1

- Elektrostatički sistem se može predstaviti električnim kolom:
 - strujni generator: mehanizam generisanja naelektrisanja (10 pA – 100 μA),
 - na kondenzatoru se naelektrisanje nagomilava,
 - otpornik predstavlja mehanizam razilaženja naelektrisanja,
 - procep za varnicu ograničava maksimalan napon u sistemu,
 - na početku procesa kondenzator je (obično) prazan, struja generatora će puniti kondenzator i napon na njemu se povećava, kako napon raste, raste i deo struje kroz otpornik,
 - ako ne dođe do pražnjenja, kolo će posle nekog vremena dostići ravnotežno stanje, kada sva nastala struja teče kroz otpornik u zemlju.



$$V = I_{ch}R = I_dR$$

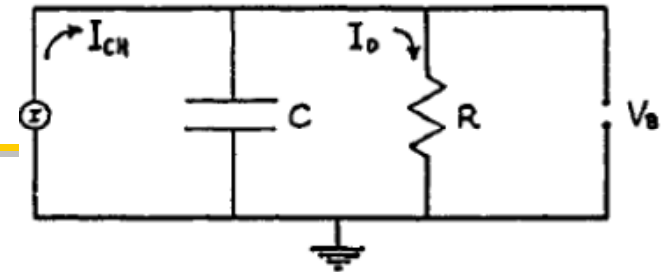
$V \equiv$ Voltage across the capacitor, V

$R \equiv$ Resistance, Ω

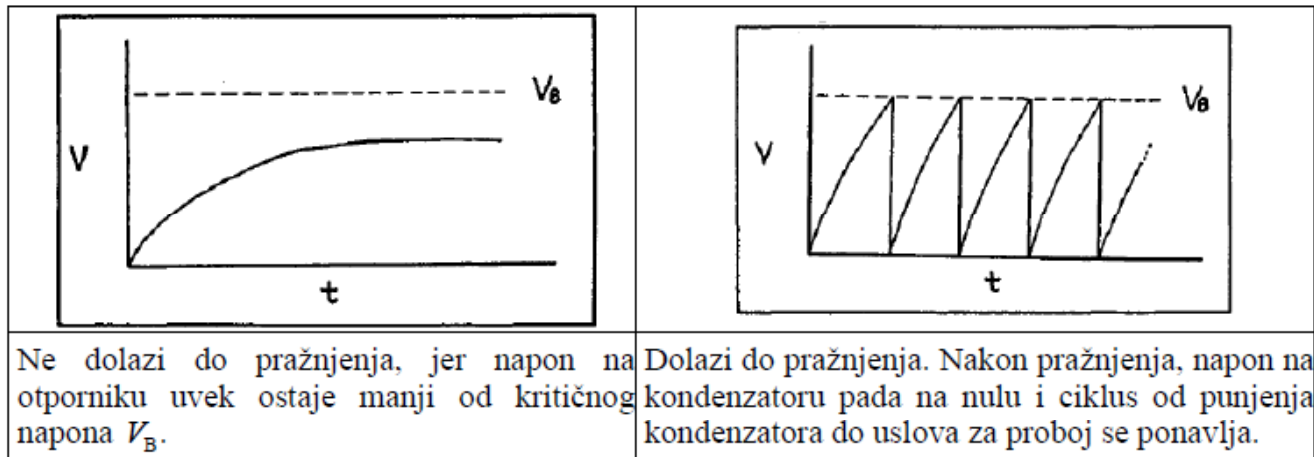
$I_{ch} \equiv$ Charging current from the source, A

$I_d \equiv$ Discharge current to ground, A

Akumulacija / 2



- moguća su dva slučaja u zavisnosti od napona na R i C



- Primer. U industrijskom procesu stvara se struja naelektrisanja od 1 nA . Kapacitivnost sistema je 10 pF , a otpornost prema zemlji $10^{14}\Omega$.

U sistemu se može javiti napon $V = RI_{ch} = 10^{14} \cdot 10^{-9} = 10^5\text{ V} = 100\text{ kV}$

Ako je električno polje povezano sa ovim naponom dovoljno veliko pojaviće se varnica. Energija oslobođena pri pražnjenju iznosila bi

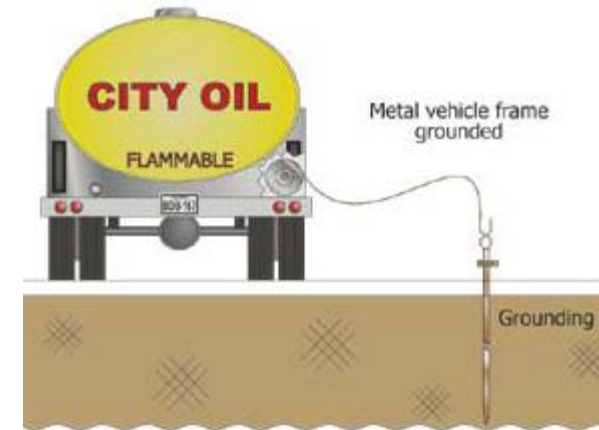
$$W = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 10^{-12} \cdot (10^5)^2 = 50\text{ mJ}, \quad W \gg \text{MEP gasova i para zapaljivih tečnosti}$$

Mere / 1

- Za merenja: elektrometri (male struje, velike otpornosti).
- Elektrostatičko uzemljenje:
 - otpornost manja od 1 MΩ (često je dovoljno i manja od 100 MΩ)
 - u industriji se smatra da pri naponima manjim od 300 V neće doći do pražnjenja
 - za eksplozive i municiju taj napon je 100 V
 - struja naelektrisavanja do 100 μA
Omov zakon: $V = RI = 1 \text{ M}\Omega \cdot 100 \text{ }\mu\text{A} = 100 \text{ V}$
 - ako struja ne prelazi 1 μA, onda za otpornost od 100 MΩ
 $V = RI = 100 \text{ M}\Omega \cdot 1 \text{ }\mu\text{A} = 100 \text{ V}$
 - prilikom instalacije i održavanja zahteva se da otpornost ne bude veća od 10 Ω
(to obezbeđuje da otpornost uvek bude manja od 1 MΩ)

Mere / 2

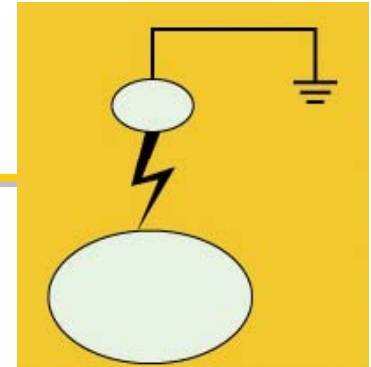
- povezati i uzemljiti provodne objekte
- ako dolazi do akumulacije naelektrisanja, potrebno je sačekati da se naelektrisanje razide
 - nakon punjenja rezervoara 30 minuta
 - nakon pranja rezervoara, preporuka je 5 sati



- Procena opasnosti od ESD
 - da li zapaljiva smeša može biti stvorena (izbeći ako je moguće)
 - da li se statički elektricitet može generisati dovoljno brzo da se akumulira
 - koji tipovi elektrostatičkih pražnjenja se mogu pojaviti
 - da li ovo pražnjenje može osloboditi energiju dovoljnu da uzrokuje paljenje
- Preporučuje se da se
 - proceni zapaljivost smeše
 - ako zapaljiva atmosfera ne može biti izbegnuta, dizajnirati sistem tako da se minimizuju i verovatnoća i posledice paljenja.

Primeri analize incidenata

Incident na pumpi / 1



Incident. Vozač je stavio pištolj za točenje benzina u rezervoar i vratio se na sedište. Zatim je brzo skliznuo sa sedišta, izašao iz auta i dotakao pištolj za punjenje. Pojavila se varnica i isparenja su se zapalila.

Analiza. Naelektrisanje se akumuliralo na čoveku i varnica se pojavila između čoveka i pištolja.

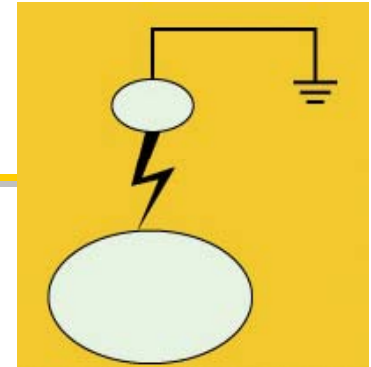
Pretpostavimo da je površina pantalona koja je došla u kontakt sa sedištem $0,1\text{m}^2$ ($33\text{cm} \times 33\text{cm}$). Kada je vlažnost vazduha mala, može se javiti $\sigma_{\text{max}} = 27\text{ }\mu\text{C}/\text{m}^2$. Naelektrisanje na čoveku

$$Q_{\text{max}} = \sigma_{\text{max}} S = 27 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{C} = 2,7\text{ }\mu\text{C}.$$

Brzina razilaženja naelektrisanja zavisi od otpornosti čoveka prema zemlji. Razmotrimo obuću. Pretpostavimo da je podloga od betona i da su cipele sa đonom od neoprena ($\rho = 10^{11}\text{ }\Omega\text{m}$) debljine 3mm , i površine $30\text{cm} \times 10\text{cm} = 0,03\text{m}^2$. Otpornost đona:

$$R = \rho \frac{l}{S} = 10^{11} \frac{3 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-2}} = 10^{10} \text{ }\Omega = 10 \text{ G}\Omega.$$

Incident na pumpi / 2



Iz kapacitivnosti čoveka $C = 200 \text{ pF}$, i otpornosti prema zemlji $R = 10 \text{ G}\Omega$:

$$\tau_{10\text{G}\Omega} = RC = 10^{10} \cdot 200 \cdot 10^{-12} = 2 \text{ s.}$$

Ako su protekle 2 s od ustajanja do doticanja pištolja, nakon te 2 s ($2 \text{ s} = \tau_{10\text{G}\Omega}$)

$$Q_{10\text{G}\Omega} = 0,368 \cdot Q_{\text{max}} = 0,368 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} = 1 \mu\text{C},$$

$$W_{10\text{G}\Omega} = \frac{Q_{10\text{G}\Omega}^2}{2C} = \frac{(1 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 200 \cdot 10^{-12}} \approx 2,5 \text{ mJ.}$$

$W_{10\text{G}\Omega}$ je 10 puta veća od MEP benzina (0,25 mJ) i može doći do incidenta.

Tri puta manjoj otpornosti ($3,3 \text{ G}\Omega$) odgovara tri puta manje vreme relaksacije, $\tau_{3,3\text{G}\Omega} = 0,67 \text{ s}$. Nakon te 2 s ($2 \text{ s} = 3\tau$)

$$Q_{3,3\text{G}\Omega} = 0,05 \cdot Q_{\text{max}} = 0,05 \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} = 0,135 \mu\text{C},$$

$$W_{3,3\text{G}\Omega} = \frac{Q_{3,3\text{G}\Omega}^2}{2C} = \frac{(0,135 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 200 \cdot 10^{-12}} \approx 0,05 \text{ mJ.}$$

$W_{3,3\text{G}\Omega}$ što je manje od MEP benzina i do incidenta ne bi došlo.

Zaključak. Da je specifična otpornost obuće bila manja, naelektrisanje bi se razilo pre kontakta sa pištoljem i do incidenta ne bi došlo.

Incident pri točenju toluena / 1

Vatra je počela za vreme punjenja kante toluenom iz rezervoara pod uticajem gravitacije. Korišćena je metalna kanta sa metalnom ručkom na kojoj se nalazi plastični držač. Držač je izolovao kantu od metalne cevi rezervoara. Operater je otvorio slavinu i odmakao se od kante. Nakon kratkog vremena, toluen se zapalio.

Analiza. Pre incidenta osoblje je bilo udaljeno od kante, što pokazuje da uzrok paljenja nije bila varnica sa čoveka.

Podaci o toluenu: $\sigma = 3000 \text{ pS/m}$, $\varepsilon_r = 2,4$, MEP $0,24 \text{ mJ}$.

Podaci o kanti: poluprečnik $11,5 \text{ cm}$, kapacitivnost $C = 20 \text{ pF}$, vreme punjenja 30 s . Kanta nije bila uzemljena.

Pretpostavka: struja toka $I = 0,1 \mu\text{A}$. Akumulisano naelektrisanje i energija su

$$Q = It = 0,1 \mu\text{A} \cdot 30 \text{ s} = 3 \mu\text{C},$$

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(3 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-12}} \approx 225 \text{ mJ}.$$

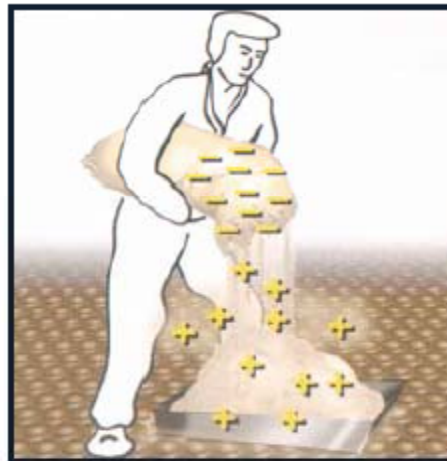
W je znatno veće od MEP $0,24 \text{ mJ}$.

Zaključak. Incident bi bio izbegnut da su metalna cev i kanta bile povezane provodnikom pre i za vreme punjenja kante. Provodnik za povezivanje se sme ukloniti tek nakon završenog punjenja.



Pražnjenje metalnog kontejnera / 1

U metalni kontejner u vidu kocke stranica dužine 1m može se uskladištiti oko 1000kg materijala u vidu praha. Vreme pražnjenja kontejnera je oko 30s. Dok se kontejner prazni, naelektrisanje jednog znaka napušta kontejner i ostavlja naelektrisanje suprotnog znaka na kontejneru. Procenjena vrednost kapacitivnosti kontejnera iznosi 100pF. Površina zidova kontejnera je 6m².



Presipanje materijala dovodi do razdvajanja naelektrisanja.

Pražnjenje metalnog kontejnera / 2

Analiza. Prvi način. Najgori slučaj je da na zidovima kontejnera postoji $\sigma_{\max} = 27 \mu\text{C}/\text{m}^2$. Tada je $Q_{\max} = \sigma_{\max} S = 162 \cdot 10^{-6} \text{C}$ i

$$W_{\max} = \frac{Q_{\max}^2}{2C} = \frac{(162 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} \approx 130 \text{J}.$$

Drugi način. Najveća specifična gustina naelektrisanja materijala u prahu je oko $0,1 \mu\text{C}/\text{kg}$. Za 1000kg dobija se $Q = 0,1 \mu\text{C}/\text{kg} \cdot 1000 \text{kg} = 100 \mu\text{C}$ i

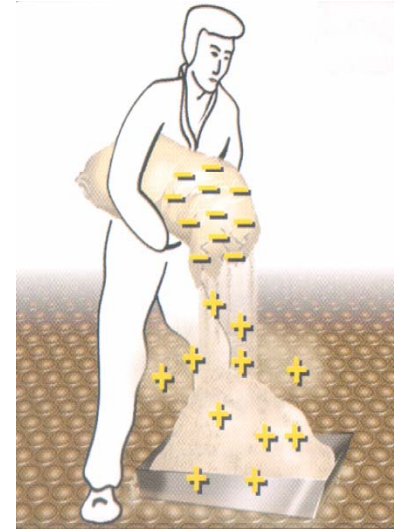
$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(100 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} \approx 50 \text{J}.$$

Treći način. Neka je energija varnice 5J (MEP nekih materijala u vidu praha). Energiji od 5J odgovara naelektrisanju kontejnera od

$$Q_{\text{MEP}} = \sqrt{2W_{\text{MEP}}C} = \sqrt{2 \cdot 5 \cdot 100 \cdot 10^{-12}} \approx 30 \mu\text{C}.$$

$30 \mu\text{C}$ iznosi oko 20% $Q_{\max}$, pa i σ iznosi oko 20% $\sigma_{\max}$.

Zaključak. Do visokoenergetskih varnica može doći ako metalni kontejneri nisu uzemljeni. Pri rukovanju materijalom, metalni kontejneri moraju biti uzemljeni.



Punjenje kante na kamionetu

Kanta za benzin je postavljena na držače od plastike u prtljažniku kamioneta. Kad je kanta napunjena, isparenja su se zapalila u okolini otvora na kanti.

Analiza. Naelektrisanje se razdvojilo pri proticanju benzina kroz crevo i akumuliralo se u izolovanoj kanti. Varnica se pojavila između otvora na kanti i uzemljenog pištolja i isparenja su se zapalila.

Ako je punjenje trajalo 20s, pri struji toka od $0,1\mu\text{A}$ akumuliralo se

$$Q = It = 0,1\mu\text{A} \cdot 20\text{s} = 2\mu\text{C}.$$

Ako je kapacitivnost kante 20pF, energija akumulirana u kanti jednaka

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(2 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-12}} \approx 0,1\text{J},$$

što je veće od MEP (0,25mJ).

Vreme relaksacije naelektrisanja u kanti (otpornost kante prema zemlji:

$R = 10^{14}\Omega$, kapacitivnost kante: $C = 20\text{pF}$)

$$\tau = RC = 10^{14} \cdot 20 \cdot 10^{-12} = 2000\text{s} = 33\text{min}.$$

τ je mnogo duže od vremena punjenja kante, i naelektrisanje se neće razići.



Punjenje silosa

Odrediti da li postoji opasnost od požara ako se material u prahu skladišti u neuzemljen metalni silos sfernog oblika poluprečnika $r = 2,5 \text{ m}$ (zapremine 70 m^3). Specifična težina materijala je $\rho_m = 600 \text{ kg/m}^3$, specifična gustina naelektrisanja $\mu = 0,1 \mu\text{C/kg}$, a MEP je 20 mJ .

Rešenje. Kapacitivnost kontejnera jednaka je

$$C = 4\pi\epsilon_r\epsilon_0 r = 4\pi \cdot 1 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 2,5 \text{ F} = 280 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 0,28 \text{ nF}.$$

Masa materijala u kontejneru je

$$m = \rho_m V = 600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 70 \text{ m}^3 = 42000 \text{ kg}.$$

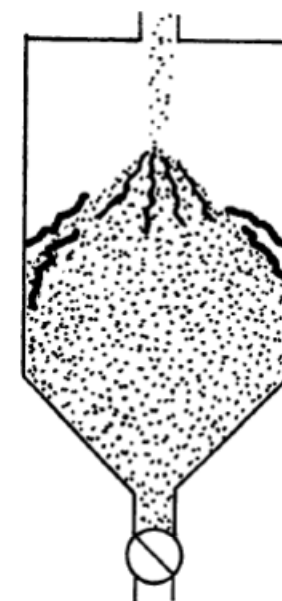
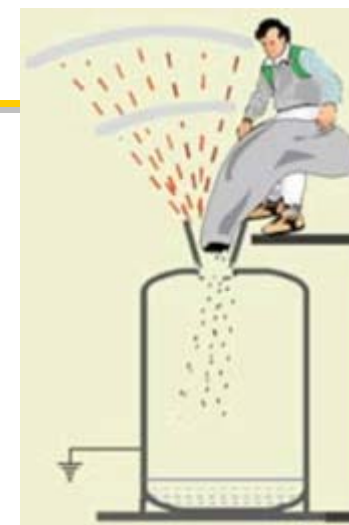
Ukupno naelektrisanje uneto u kontejner iznosi

$$Q = m\mu = 42000 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ C} = 12,6 \cdot 10^{-3} \text{ C} = 4,2 \mu\text{C}.$$

Energija uskladištena u kontejneru jednaka je

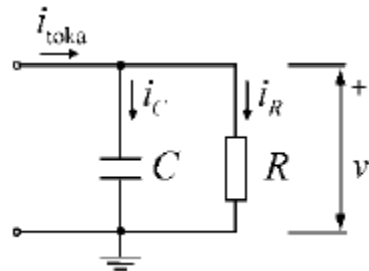
$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(4,2 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 0,28 \cdot 10^{-9}} \text{ J} = 31,5 \cdot 10^{-3} \text{ J} = 31,5 \text{ mJ}.$$

W je veće od MEP i postoji opasnost od pojave konusnog pražnjenja.



Struja toka

Tečnost se uliva u metalno bure izolovano od zemlje. Struja toka u tečnosti je $1\mu\text{A}$. Kapacitivnost bureta je $C = 200\text{pF}$, a otpornost prema zemlji $R = 10\text{G}\Omega (10^{10}\Omega)$. Odrediti a) maksimalan potencijal bureta, i b) maksimalnu električnu energiju uskladištenu u buretu.



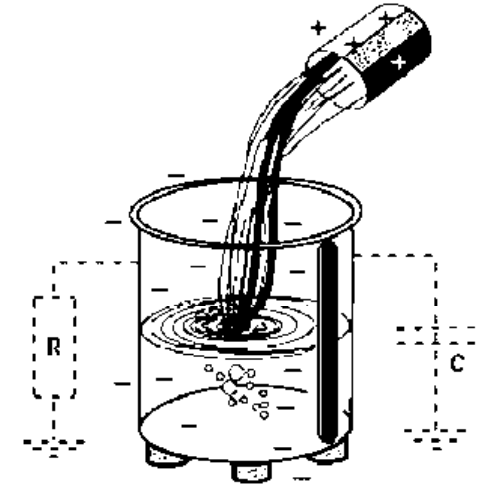
a) Potencijal bureta je $v = Ri_R$. Potencijal je maksimalan za $i_R = i_{\text{toka}}$,

$$V_{\text{max}} = Ri_{\text{toka}} = 10^{10}\Omega \cdot 10^{-6}\text{A} = 10^4\text{V} = 10\text{kV}.$$

b) Maksimalna energija uskladištenu u buretu je

$$W_{\text{max}} = \frac{1}{2}CV_{\text{max}}^2 = \frac{1}{2}200 \cdot 10^{-12} \cdot (10^4)^2\text{J} = 0,01\text{J} = 10\text{mJ}.$$

W_{max} je mnogo veće od MEP za ugljovodonike.



Veličina provodnog objekta

Koliko veliki treba da je provodni objekat da bi mogla da se pojavi varnica dovoljne energije da dovede do paljenja?

Neka je objekat provodna sfera poluprečnika a , kapacitivnosti $C = 4\pi\epsilon_r\epsilon_0a$. Tada je $Q_{\max} = 4\pi\epsilon_r\epsilon_0a^2E_{\max}$ i

$$W_{\max} = \frac{Q_{\max}^2}{2C} = \frac{(4\pi\epsilon_r\epsilon_0a^2E_{\max})^2}{2 \cdot 4\pi\epsilon_r\epsilon_0a},$$

odakle je

$$a^3 = \frac{2W_{\max}}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0E_{\max}^2}, \quad a = \sqrt[3]{\frac{2W_{\max}}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0E_{\max}^2}}.$$

U vazduhu: $E_{\max} = 3\text{MV/m}$, $\epsilon_r = 1$. Za $W_{\max} = 0,25\text{mJ}$

$$a = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (3 \cdot 10^6)^2}} = \sqrt[3]{0,5 \cdot 10^{-6}} = 0,8 \cdot 10^{-2}\text{m} = 8\text{mm}.$$

Ne može doći do zapaljivog pražnjenja sa sfere ako je $a < 8\text{mm}$. Za $a = 8\text{mm}$, $C = 4\pi\epsilon_0a = 4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \approx 0,9\text{pF}$.

U praksi, tek objekat veličine krigle može dovesti do pražnjenja energije veće od MEP ugljovodonika. Uzemljuju se svi objekti čija je kapacitivnost veća od 3pF.

