

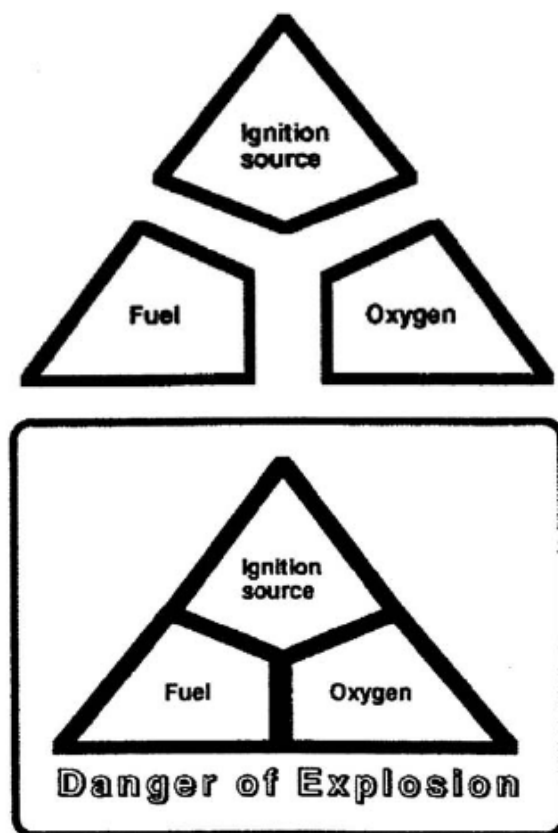
7. Elektrostatičko pražnjenje

7.1. Uvod – uslovi za paljenje

Eksplozije su česti uzročnici požara, havarija, materijalne štete kao i gubitka ljudskih života.

Za požar ili eksploziju je potrebno prisustvo

- zapaljive supstance,
- izvora paljenja,
- kiseonika.

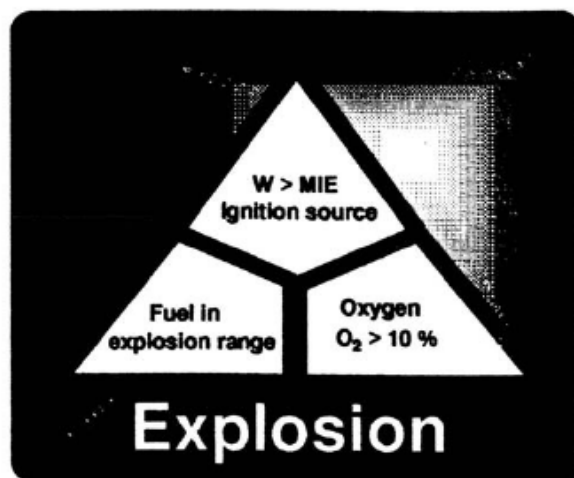


Prisustvo zapaljive supstance, kiseonika i izvora paljenja nisu dovoljni da dođe do eksplozije. Da bi došlo do eksplozije potrebno je da

- zapaljiva smeša bude u eksplozivnim granicama,
- koncentracija kiseonika mora biti veća od 10%,
- izvor paljenja mora osloboditi energiju veću od minimalne energije paljenja.

Minimalna energija paljenja je definisana kao najmanja količina energije potrebna da izazove paljenje smeše. Izražava se u mJ (kreće se u rasponu od 10^{-5} J do nekoliko J).

Javlja se pri optimalnoj koncentraciji smeše pare ili gasa i vazduha.



7.1.1. Izvori paljenja

Ignition source

- 1 Hot surface
- 2 Flames and hot gases
- 3 Mechanical sparks
- 4 Electrical equipment
- 5 Cathodic protection against corrosion, transient current
- 6 Static electricity
- 7 Lightning stroke
- 8 Electromagnetic waves (high frequency range)
- 9 Electromagnetic waves (optical range)
- 10 Ionizing radiation
- 11 Ultrasonics
- 12 Adiabatic compression
- 13 Chemical reaction

Example

- heating pipe; casing of an electrical apparatus
- autogeneous welding; exhaust gases
- abrasive cutting; flint gas lighter
- electrical sparks at make and break
- sneak current; short circuit to earth
- spark discharge; brush discharge
- induction heating; radiotelephone
- photoflash; laser
- X-rays; UV-rays
- ultrasonic cleaning; ultrasonic testing
- heat of compression; drift wave
- exothermic process

Izazivači paljenja i eksplozije mogu biti električne i neelektrične prirode.

Električni uzročnici paljenja su po pravilu veoma opasni i predstavljaju dejstvo elektriciteta u raznim oblicima. Pri tome se razlikuju električni uzročnici koji se nalaze unutar električnog sistema (mreža sa električnim izvorima, potrošačima i komandno-signalnim elementima) i uzročnici van električnog sistema (atmosfersko pražnjenje i statički elektricitet).

Mere zaštite od eksplozije se dele na primarne i sekundarne mere zaštite. Primarne mere zaštite od eksplozije obuhvataju sve mere koje sprečavaju formiranje potencijalno eksplozivne atmosfere. Sekundarne mere zaštite od eksplozije se koriste ako opasnost od eksplozije ne može biti uklonjena ili može biti samo delimično uklonjena.

7.1.2. Gasovi i pare zapaljivih tečnosti

Ne mogu sve smeše goriva i vazduha biti upaljene. Umesto toga, postoji konačan opseg koncentracija unutar kog smeša pare ili gasa i vazduhu može biti zapaljena. Ovo se naziva opseg zapaljivosti (eksplozivnosti). On je određen donjom i gornjom granicom eksplozivnosti. Donja granica eksplozivnosti (DGE) označava koncentraciju zapaljivog gasa ili pare u vazduhu ispod koje se neće stvoriti eksplozivna atmosfera. Gornja granica eksplozivnosti (GGE) označava koncentraciju zapaljivog gasa ili pare u vazduhu iznad koje se neće stvoriti eksplozivna atmosfera.

Iznad gornje granice ovog opsega smeša postaje prezasićena gasom ili parom i ne može biti upaljena. Slično, ako koncentracija gasa ili pare padne ispod donje granice, tada je prisutno nedovoljno zapaljive supstance da podrži sagorevanje. Za većinu smeša ugljovodonika i vazduha ove granice su od 1% do 15% zapremine. Supstance sa širokim opsegom zapaljivosti su posebno opasne.



Slika 7.1. Opseg i granice eksplozivnosti.

Poznato je da se količina gasa ili pare u vazduhu može izraziti preko temperature (pri konstantnom pritisku i zapremini). Zbog toga, opseg zapaljivosti se takođe može izraziti preko temperature.

Temperatura paljenja označava najnižu temperaturu na kojoj smeša para-vazduh formirana po površi tečnosti može biti zapaljena izvorom paljenja. Na temperaturi paljenja, para može da prestane da gori kada se izvor paljenja ukloni. Obično nije moguće zapaliti smešu pare i vazduha iznad tečnosti koja je na temperaturi nižoj od njene temperature paljenja.

Kao primer, kerozin ima temeperaturu paljenja 45°C , što pokazuje da se kerozin neće zapaliti na sobnoj temperaturi. Kao drugi primer, toluene ima temperature paljenja 6°C , što pokazuje da se toluene može zapaliti i na sobnoj temperaturi.

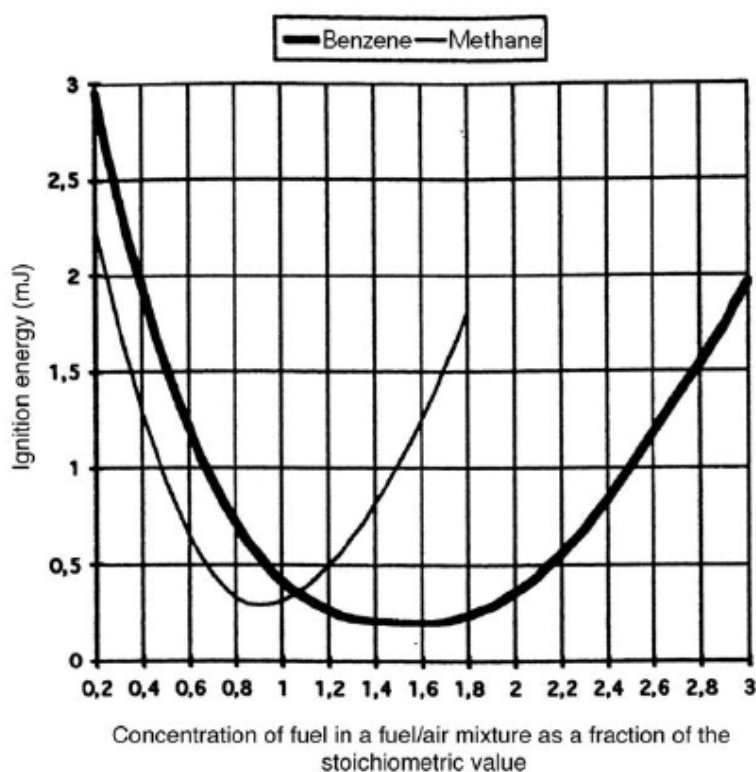
Minimalna energija paljenja (MEP) je definisana kao najmanja količina energije potrebna da izazove paljenje smeše. Izražava se u mJ (tipične vrednosti su u rasponu od 10^{-5} J do nekoliko J).

Javlja se pri optimalnoj koncentraciji smeše pare ili gasa i vazduha.

Najniža MEP za ugljovodonične gasove je reda 0,25 mJ.

Mnoge prašine koje se javljaju pri proizvodnji prehrambenih artikala, kao na primer belog brašna ili pri pakovanju čajeve, lebde u vazduhu i kao takve su izuzetno eksplozivne.

Minimalna energija paljenja zavisi od temperature, sastava atmosfere, pritiska, itd. Povećanjem temperature smanjuje se MEP. Povećanjem koncentracije kiseonika smanjuje se MEP. Povećanjem pritiska smanjuje se MEP.



Slika 7.2. Minimalna energija paljenja.

7.1.3. Literatura

G. Luttgens and N. Wilson, *Electrostatic Hazards*, Reed Educational and Professional Publishing Ltd 1997.

T. H. Pratt, *Electrostatic Ignitions of Fires and Explosions*, USA, 2000.

N. Dragović, *Opasnosti izazvane statičkim elektricitetom u naftnoj industriji*, diplomski rad, Univerzitet u Banja Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, april 2011.

7.2. Osnovni pojmovi

7.2.1. Podela materijala u elektrostatiki

Materijali se u kontekstu statičkog elektriciteta dele na provodne, disipativne i izolatore.

Tabela 7.1. Podela materijala.

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

Specifična otpornost (specifična provodnost) je karakteristika materijala i ne zavisi od oblika, niti veličine tela.

Ljudsko telo se sa tačke gledišta statičkog naelektrisanja ponaša kao provodnik.

Opseg vrednosti specifičnih otpornosti je veoma širok. Specifična otpornost metala je reda $10^{-8}\Omega\text{m}$. Specifična otpornost plastike, npr. teflona je $10^{19}\Omega\text{m}$.

Tabela 7.2. Poređenje specifičnih otpornosti (i provodnosti) metala i plastike.

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

Tabela 7.3. Specifične otpornosti i provodnosti vazduha i vode.

Materijal	Specifična otpornost $\rho[\Omega\text{m}]$	Specifična provodnost $\sigma[\text{S/m}]$
Vazduh	$1,3 \cdot 10^{16} - 3,3 \cdot 10^{16}$	$3,3 \cdot 10^{-17} - 7,7 \cdot 10^{-17}$
Voda	20 – 200	0,005 – 0,05
Morska voda	0,2	5

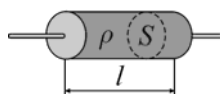
7.2.2. Otpornost

Otpornost nekog uzorka (slika 7.3) može se izračunati iz relacije

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (7.1)$$

Na osnovu izraza (7.1), otpornost uzorka zavisi od njegovog oblika i dimenzija, kao i od vrste materijala.

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



Slika 7.3. Uzorak materijala sa električnim kontaktima na oba kraja.

7.2.3. Raspodela naelektrisanja

Tačkasto naelektrisanje

Linijsko (podužno) naelektrisanje

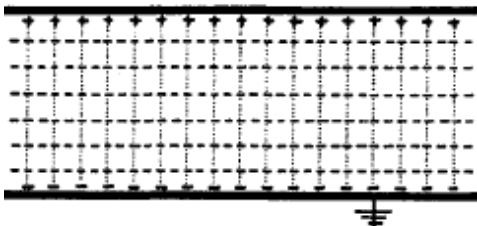
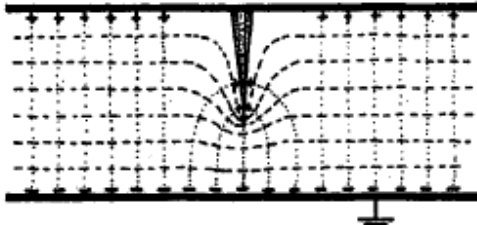
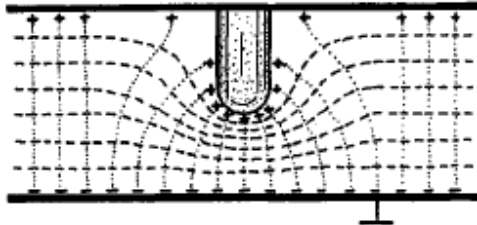
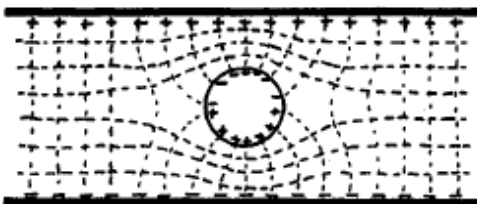
Površinsko naelektrisanje može da postoji na površini dielektrika, ali i provodnika. U ovom slučaju naelektrisanje se akumulira na površini, a ne u unutrašnjosti materijala. Ovakvo naelektrisanje se javlja na plastikama.

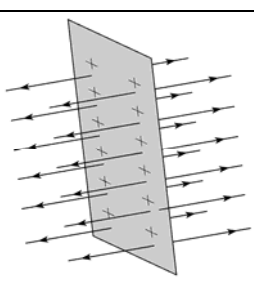
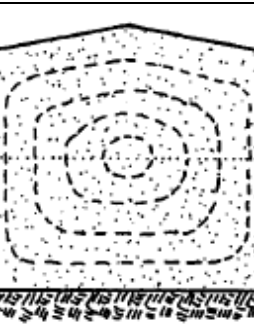
Zapreminsko naelektrisanje može da postoji u dielektriku. Primeri su naelektrisani prah u silosima, naelektrisane tečnosti u rezervoarima ili magla od naelektrisanih kapljica. U ovim slučajevima električno polje postoji unutar ove raspodele naelektrisanja.

7.2.4. Linije električnog polja

Linije električnog polja se koriste za vizuelnu predstavu električnog polja. Ekvipotencijalne površi i linije električnog polja su međusobno normalne u svim tačkama. (Ekvipotencijalne površi su površi konstantnog potencijala.) Linije električnog polja se nazivaju i linijama električne sile. Linije električnog polja počinju na pozitivnom naelektrisanju, a završavaju na negativnom naelektrisanju.

7.2.5. Primeri električnog polja

	Električno polje u pločastom kondenzatoru (zanemareni ivični efekti) je homogeno. Povećanje napona između ploča rezultovaće u povećanju jačine električnog polja u kondenzatoru, $E = U/d$, gde je sa d označeno rastojanje ploča, a U je napon između ploča.
	Ako se u prostor između ploča unese neki objekat, doći će do perturbacije električnog polja. U primeru na slici dodat je objekat od metala u obliku šiljka (videti koronu). Linije električnog polja su najgušće u okolini vrha šiljka, što ukazuje da je tu jačina električnog polja najveća.
	U primeru na slici dodat je objekat od metala sa zaobljenim vrhom i ponovo je došlo do perturbacije električnog polja. Linije električnog polja su najgušće u okolini zaobljenog vrha objekta, što ukazuje da je tu jačina električnog polja najveća.
	U ovom primeru u električno polje je uneta nenaelektrisana provodna sfera. Pod uticajem električnog polja dolazi do preraspodele naelektrisanja na provodniku (ukupna količina naelektrisanja i dalje je jednaka nuli). Ovo je primer elektrostatičke indukcije.

	U primeru na slici prikazane su linije električnog polja u okolini naelektrisanе površi dielektrika. Električno polje postoji sa obe strane naelektrisanja.
	Na slici je prikazana zapreminska raspodela naelektrisanja (prethodne raspodele su bile površinske) unutar metalnog rezervoara. Primer koji odgovara ovom slučaju su naelektrisane kapljice magle koja se može pojaviti nakon pranja ili tokom čišćenja parom. Metalni rezervoar je uzemljen, jer se nalazi na zemlji. Na slici su prikazane ekvipotencijalne linije. Električno polje je najjače u okolini centra.

7.2.6. Dielektrici

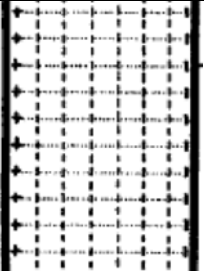
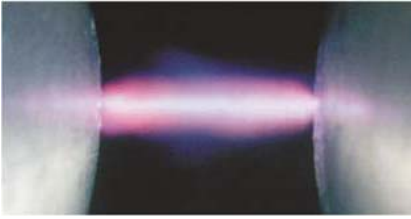
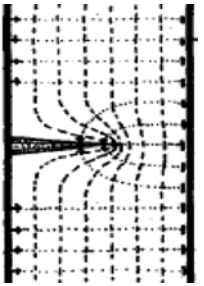
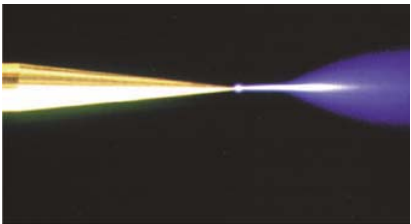
U pločastom kondenzatoru provodne ploče su razdvojene dielektrikom (električnim izolatorom). Kapacitivnost kondenzatora zavisi od dielektrika u prostoru između provodnih ploča.

Relativna permitivnost pokazuje koliko puta materijal smanjuje električno polje u odnosu na polje koje bi postojalo u vakuumu. Relativna permitivnost za vazduh jednaka je jedinici, što pokazuje da vazduh ne slabi električno polje. Relativna permitivnost provodnika je beskonačna, što pokazuje da provodnici u potpunosti „zaustavljaju“ električno polje.

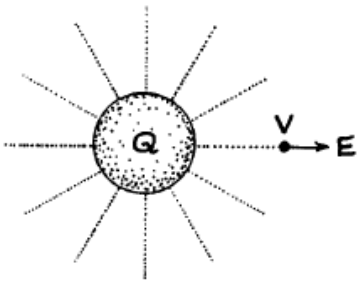
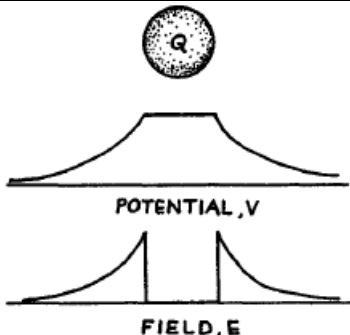
Svaki dielektrik se ponaša kao izolator samo do izvesne jačine električnog polja u njemu. Električna čvrstina dielektrika je maksimalna jačina električnog polja koju dielektrik može da izdrži i da zadrži svoja izolatorska svojstva. Električna čvrstina dielektrika je karakteristična za svaki materijal.

Električna čvrstina suvog vazduha je oko 3 MV/m. Za vlažan vazduha je manja.

Kada električno polje postoji u nekom materijalu, ono deluje na elektrone u atomima i molekulima. Sa povećanjem električnog polja dolazi se do tačke kada elektroni napuštaju atome ili molekule i dolazi do proboja materijala. Kad se ovo desi, pojaviće se električna struja kroz plazmu sve dok se električno polje ne smanji i struja prestane. Do proboja dolazi kada jačina električnog polja dostigne kritičnu vrednost, koja se naziva električna čvrstina dielektrika.

	U slučaju približno homogenog električnog polja, kada jačina polja dostigne električnu čvrstinu dielektrika, formiraće se provodni kanal između dve ploče. Ovakav tip pražnjenja naziva se varnica.	
	U slučaju nehomogenog električnog polja, polje je najjače u okolini šiljka. Kada jačina polja dostigne električnu čvrstinu dielektrika, to će se desiti u okolini šiljka. Joni će se formirati u okolini šiljka i neće postojati provodni kanal. Joni će se kretati kroz vazduh sve dok se ne neutrališu. Ovakvo pražnjenje naziva se korona.	

7.2.7. Električno polje i potencijal

	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 vakuma $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ 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 (slika). Sve tačke na površi i unutar provodnika su na istom potencijalu (ekvipotencijalna površ). Ako je provodna sfera šuplja i na unutrašnju površinu se dovede naelektrisanje, to naelektrisanje će veoma brzo preći na spoljašnju površinu.

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

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

Posmatrajmo sferu poluprečnika a naelektrisanu ukupnom količinom naelektrisanja Q . Ako je naelektrisanje ravnomerno raspoređeno po sferi, površinska gustina naelektrisanja jednaka je količniku iz ukupne količine naelektrisanja i površine sfere

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi a^2}.$$

U tom slučaju, električno polje na površi sfere se može napisati preko površinske gustine naelektrisanja,

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0 a^2} = \frac{1}{\epsilon_r\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{4\pi a^2} = \frac{\sigma}{\epsilon_r\epsilon_0}.$$

Iz prethodnog izraza sledi da su površinska gustina naelektrisanja i električno polje na površi sfere povezani relacijom $\sigma = \epsilon_r\epsilon_0 E$. Međutim, relacija $\sigma = \epsilon_r\epsilon_0 E$ je znatno opštija od ovog primera u kojem je izvedena.

Ako je naelektrisanje akumulirano na površi tela, jačina električnog polja je najveća na samoj površi. Ta jačina električnog polja je proporcionalna površinskoj gustini naelektrisanja,

$$\sigma = \epsilon_r\epsilon_0 E, \quad (7.2)$$

σ površinska gustina naelektrisanja (C/m^2),

ϵ_r relativna permitivnost (neimenovan broj),

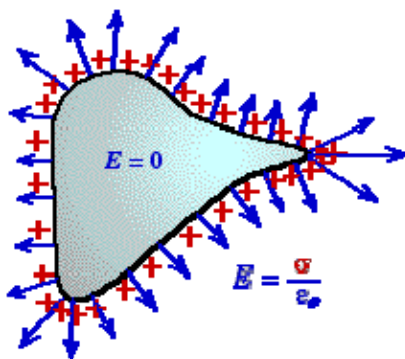
$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ permitivnost vakuuma,

E jačina električnog polja (V/m).

Sa povećanjem površinske gustine naelektrisanja, povećaće se i jačina električnog polja.

U praksi i u industriji, skoro svi problemi usled elektrostatičkih pražnjenja povezani su sa pojavom površinskog naelektrisanja.

U vazduhu je $\epsilon_r = 1$ i prema tome $\sigma = \epsilon_0 E$, odnosno električno polje na površini provodnog tela može se odrediti kao $E = \sigma/\epsilon_0$ (slika 7.4).



Slika 7.4. Naelektrisanio provodno telo u vazduhu.

Najveća površinska gustina naelektrisanja u vazduhu odgovara najvećoj jačini električnog polja u vazduhu (električnoj čvrstini vazduha) $E_{\max} = 3 \text{ MV/m}$,

$$\sigma_{\max} = \epsilon_0 E_{\max} = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 10^6 \approx 27 \mu\text{C/m}^2. \quad (7.3)$$