

## Vsebina

Hitrost gorenja in hitrost sproščanja toplote

---

---

---

---

---

---

---

---

## Hitrost gorenja

hitrost gorenja je večja,  
pri višji koncentraciji kisika  
če je večja površina goriva v stiku s kisikom -  
("finejša" razdelitev goriva)

hitrost gorenja podamo kot hitrost odgorevanja  
masni tok - masa zgorelega goriva  
 $\dot{m}$  v časovni enoti (g/s)  
 $\dot{m}''$  v časovni enoti na enoto površine (g/s m<sup>2</sup>)

---

---

---

---

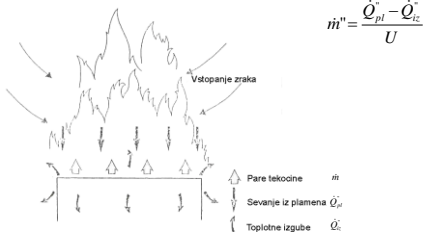
---

---

---

---

## Hitrost gorenja tekočin in trdnih snovi




---

---

---

---

---

---

---

---

### Hitrost gorenja tekočin in trdnih snovi

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}_{pl}'' - \dot{Q}_{iz}''}{U} \quad \text{odvisno od lastnosti snovi in pogojev v okolju}$$

$\dot{m}''$  - hitrost gorenja (g/m<sup>2</sup> s)

$\dot{Q}_{pl}''$  - toplotni tok iz plamena na površino tekočine (kW/m<sup>2</sup>)

$\dot{Q}_{iz}''$  - izgube toplote s površine tekočine v okolico (kW/m<sup>2</sup>)

$U$  - uparjalna toplota (kJ/g)

---

---

---

---

---

---

---

---

### Hitrost gorenja - $\dot{m}''$ in $\Delta H$

snov	$\dot{m}''$	kg/m <sup>2</sup> s	$\Delta H$	MJ/kg
PE		0,026		43,6
PP		0,024		43,4
kerozin (30-80 m)		0,065		44,1
PS		0,034		39,2
PU - mehka pena		0,021-0,027		23,2-27,2
PU - trda pena		0,022-0,025		25-28

Hitrosti gorenja so določene eksperimentalno.

---

---

---

---

---

---

---

---

### Hitrost gorenja - $\dot{m}''$

$\dot{m}''$  se poveča zaradi:  
 dodatnega segrevanja iz okolja  
 vroče površine in plasti dima v požaru  
 povečane koncentracije kisika (višja  $T$  plamena)

---

---

---

---

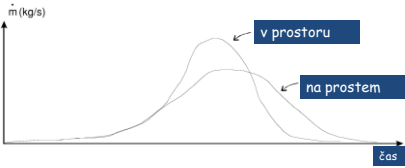
---

---

---

---

### Hitrost gorenja - $\dot{m}$



V prostoru se vroči plini nabirajo pod stropom, grejejo strop in stene, ki sevajo na gorivo.  
 Količina kisika v prostoru je lahko omejena (majhne odprtine, okna...), ne zgorejo vsi nastali gorljivi plini, sprosti se manj energije.

---

---

---

---

---

---

---

---

### Gorenje razlite tekočine - „pool fire“

Razlita tekočina predstavlja veliko nevarnost za požar.  
 Nekatere tekočine so lahko hlapne, z zrakom tvorijo vnetljive zmesi, lahko pride do eksplozije.  
 Nekatere tekočine imajo visoko plamenišče, a po vžigu se plamen zelo hitro razširi po površini tekočine.  
 Hitrost gorenja tekočine doseže **konstantno vrednost**, ki je odvisna od premera razlitja in dveh empiričnih konstant.

---

---

---

---

---

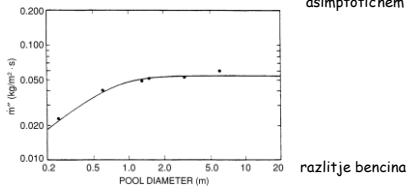
---

---

---

### Gorenje razlite tekočine - „pool fire“

Rezultati številnih eksperimentalnih meritev (različne tekočine, različni premeri) kažejo: za razlitja z  $D > 0,2$  m se hitrost prostega gorenja  $\dot{m}''$  povečuje do neke „končne vrednosti“  $\dot{m}''_{\infty}$  (hitrost gorenja pri asimptotičnem  $D$ ).




---

---

---

---

---

---

---

---

## Gorenje razlite tekočine - „pool fire“

Hitrost prostega gorenja je odvisna od premera požara, povečuje se do neke „končne vrednosti“ (hitrost gorenja pri asimptotičnem  $D$ ). Enačba je rezultat številnih eksperimentalnih meritev (različne tekočine, različni premeri).

$$\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}'' (1 - e^{-k\beta D})$$

$\dot{m}''$  hitrost prostega gorenja

$\dot{m}_{\infty}''$  hitrost gorenja pri asimptotičnem  $D$

$k\beta$  empirični konstanti, v tem primeru je pomemben njun produkt [ $m^{-1}$ ]

$D$  - premer [m]

$\dot{m}_{\infty}''$  in  $k\beta$  odvisno od vrste tekočine

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Gorenje tekočih goriv

Hitrost zgorevanja lahko pri tekočinah izražamo kot hitrost zniževanja gladine.

$$\dot{h} = \frac{\dot{Q}_{pl} - \dot{Q}_{iz}}{\rho U}$$

$\dot{h}$  - hitrost zniževanja gladine pri zgorevanju [m/s]  
(podatki za prakso [mm/min])

$\rho$  - gostota tekočine

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Hitrost gorenja tekočin

tekočina	$\dot{m}_{\infty}''$ (kg/ m <sup>2</sup> s)	$U$ (kJ/kg)	$\dot{h}_{\infty}$ (mm/min)	$T_{\text{plamen}}$ (°C)
metanol	0,017	1,10	1,7	1200
etanol	0,015	0,838		
benzen	0,085	0,394		921
heksan	0,074	0,335	7,3	
heptan	0,101	0,318		
bencin	0,055			
kerozin	0,039			990

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Hitrost sproščanja toplote - $\dot{Q}$

najpomembnejše merilo za potek gorenja, ker kaže na posledice v okolju

$\dot{Q}$  hitrost sproščanja toplote ali toplotni tok [kJ/s ali kW]  
(včasih oznaka HRR heat release rate)

podatek rabimo pri izračunih v inženirskih metodah za oceno

višine plamena  
sevanja plamena v okolico  
razvoja požara in verjetnosti požarnega preskoka v prostoru  
maksimalnih temperatur v prostoru  
oceno posledic požara (škoda)

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

$\dot{Q}$

red velikosti

goreča cigareta	5 W
žarnica	60 W
človek - običajna aktivnost	100 W
gorenje koša za smeti (~1 kg papirja)	100 kW
gorenje bencina, luža 1 m <sup>2</sup>	2,5 MW
gorenje PS lončkov v kartonu višina 4,9 m, površina 2 m <sup>2</sup>	30-40 MW
jedrska elektrarna	500-1000 MW

---

---

---

---

---

---

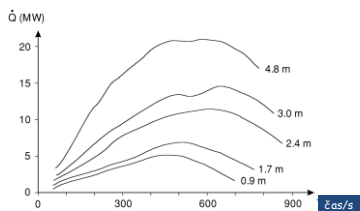
---

---

---

---

## Hitrost sproščanja toplote - $\dot{Q}$



„predviden ali pričakovani“ požar v ang. literaturi „design fire“

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Požarni scenarij

Scenarij predvidenega požara se izdelava na dva načina,  
na podlagi požarne obremenitve ali  
predviden je vžig in gorenje  
 $\dot{Q}$  se oceni glede na podatke iz preteklosti

glede na vrsto objekta (industrijski objekt, trgovski, stanovanjski...)  
uporaba statističnih podatkov

---

---

---

---

---

---

---

---

## Hitrost sproščanja toplote

Je odvisna od

goriva  
vrste, množine in orientacije v prostoru

okolice  
vpliva prostora na prenos toplote

---

---

---

---

---

---

---

---

## Hitrost sproščanja toplote $\dot{Q}$ in $\dot{Q}''$

$$\dot{Q} = \dot{m} \chi \Delta H_c \quad \dot{Q} = \dot{m}'' \chi \Delta H_c A \quad \dot{Q}'' = \dot{m}'' \chi \Delta H_c$$

hitrost sproščanja toplote  $\dot{Q}$  [kW]  $\dot{Q}''$  [kW/m<sup>2</sup>]

hitrost gorenja oz.  
masni tok goriva  $\dot{m}$  [kg/s]  $\dot{m}''$  kg/m<sup>2</sup>s

učinkovitost gorenja (0 - 1)  $\chi$

površina  $A$  m<sup>2</sup>  
entalpija gorenja  $\Delta H$  [kJ/kg]

$\dot{Q}$  odvisna od lastnosti snovi ( $U$ ,  $\Delta H$ ) in pogojev v okolju

$\dot{m}''$  odvisna od toplotnega toka na gorivo  
in od unarjalne vrednosti goriva

---

---

---

---

---

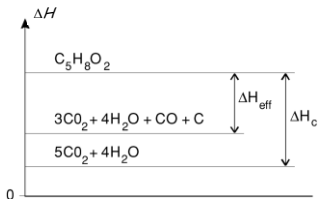
---

---

---

$\Delta H_r$  in  $\Delta H_{eff}$ 

$$\chi = \frac{\Delta H_{eff}}{\Delta H_r} = \frac{18,2 \text{ kJ/g}}{24,9 \text{ kJ/g}} = 0,73$$




---

---

---

---

---

---

---

---

## Učinkovitost gorenja tekočin

Učinkovitost gorenja je značilna lastnost gorljivih tekočin.

Gorljiva snov	Učinkovitost
aceton	0,97
benzen	0,69
n-butan	0,95
etanol	0,97
bencin	0,92
heptan	0,92
heksan	0,92
metanol	0,95
transf. olje	0,84

---

---

---

---

---

---

---

---

 $\dot{Q}$  eksperimentalno

$$\dot{Q} = \chi \cdot \dot{m} \cdot A_g \cdot \Delta H_r$$

$\dot{Q}$  v večini primerov ni mogoče izračunati, ker se

hitrost gorenja in sproščanja toplote spreminja glede na:  
velikost objekta,  
uporabljene materiale,  
vir vžiga,  
delovanje retardantov (zaviralcev gorenja),...

Kako gorenje poteka lahko preskusimo v kalorimetru, pri preskusu merimo porabo kisika za gorenja. Rezultate teh meritev lahko uporabimo v računih.

---

---

---

---

---

---

---

---

## Hitrost sproščanja toplote - $\dot{Q}$

za požar v prostoru, ki ga "kontrolira" kisik

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{zrak}} \cdot \Delta H_{f/\text{zrak}}$$

$\dot{Q}$  hitrost sproščanja toplote ali toplotni tok [kJ/s ali kW]

$\dot{m}_{\text{zrak}}$  masni tok zraka v prostor [kg/s]

$\Delta H_{f/\text{zrak}}$  - 3,0 kJ/g zraka, ki se porabi pri gorenju [kJ/g]

ocena:  $\dot{m}_{\text{zrak}} = 0,52 \cdot A \cdot h^{1/2}$

$A$  - površina [m<sup>2</sup>],  $h$  - višina odprtine za prezračevanje [m]

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Hitrost sproščanja toplote - $\dot{Q}$

Raziskave in preskušanje materialov,  
merjenje volumskega pretoka kisika v odvodu

$$\dot{Q} = (0,21 - x_{O_2}) \cdot \dot{V} \cdot 10^3 \cdot \rho_{O_2} \cdot \Delta H_{f/O_2}$$

$\dot{Q}$  hitrost sproščanja toplote ali toplotni tok [kJ/s ali kW]

$\dot{V}$  volumski pretok zraka [m<sup>3</sup>/s]

$\rho_{O_2}$  gostota O<sub>2</sub> pri normalnem tlaku in temperaturi [kg/m<sup>3</sup>]

$x_{O_2}$  množinski delež O<sub>2</sub> v čistem plinu

$\Delta H_{f/O_2}$  - 12,7 - 13,0 kJ/g O<sub>2</sub>, ki se porabi pri gorenju [kJ/g]

---

---

---

---

---

---

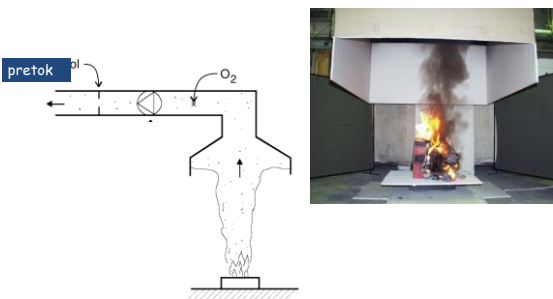
---

---

---

---

## Merjene porabe kisika




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



### $\dot{Q}$ različnih produktov

Tekočine dosežejo skoraj konstantno  $\dot{Q}$ , pri trdnih snoveh in produktih pa se ta s časom spreminja.

Po vžigu je za gorenje značilno, da intenziteta narašča, doseže konstantno vrednost in pojema.

Govorimo o rastočem, razvitem in pojemajočem požaru.

Za vsak produkt je veliko možnosti razvoja požara, pomemben je tudi vir vžiga.

---

---

---

---

---

---

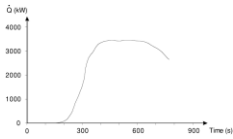
---

---

---

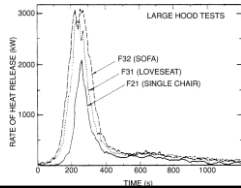
---

### $\dot{Q}$ različnih produktov



9 lesenih palet (1,22 x 1,22 x 0,14 m), ki so zložene ena na drugo H = 1,22 m in gorijo na prostem.

Oblazinjeno pohištvo




---

---

---

---

---

---

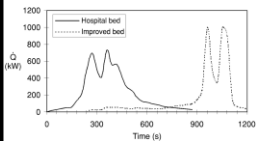
---

---

---

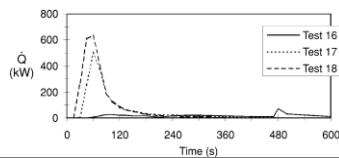
---

### $\dot{Q}$ različnih produktov



Gorenje vzmetnice

Gorenje novoletne jelke




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### Gorenje po vžigu v rastočem požaru

Značilno je naraščanje intenzitete gorenja - primerno predvsem za gorenje pohištva in gorenje v objektih brez posebnih nevarnosti (plini, vnetljive tekočine).

$$\dot{Q} = \alpha(t - t_i)^n$$

$\dot{Q}$  = hitrost sproščanja toplote v požaru v fazi rastočega požara [kW]

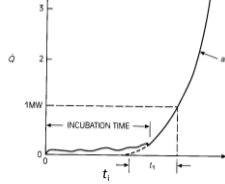
$t$  = čas [s]

$t_i$  = [s] to je čas od vžiga do pojava plamena, ko se začne sproščati veliko energije

$t_i$  je odvisen od vrste goreče snovi in vira vžiga

$\alpha$  = parameter razvoja požara [kW/s<sup>2</sup>]

$n = 2$  za veliko požarov (ne velja za vnetljive tekočine)




---

---

---

---

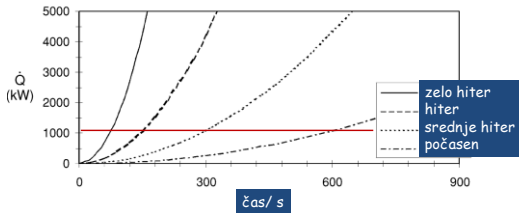
---

---

---

---

### $\dot{Q}$ za požare z različnim razvojem




---

---

---

---

---

---

---

---

### Časovno odvisni požar

Hitrost sproščanja toplote je odvisna od časa.

Požari, ki nastanejo v relativno majhnem prostoru in se hitro razvijajo.

Ni primerno za velike industrijske objekte, kjer vroči plini dosežejo strop kasneje kot v 10 sekundah.

---

---

---

---

---

---

---

---

## Časovno odvisni požar

Stopnja rasti požara	$\alpha$ [kW/ s <sup>2</sup> ]	$t$ [s] do $\dot{Q} = 1055\text{kW}$	
Počasno	0,0029	600	tesno naložen papir
Srednje	0,012	300	klasične vzmetnice, naslanjači
Hitro	0,047	150	PU vzmetnice, PE palete (1 m)
Izredno hitro	0,188	75	visokoregalna skladišča

Enačba se uporablja pri projektiranju sistemov za odkrivanje požara v ZDA.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Časovno odvisni požar

Pričakovana stopnja rasti požara v različnih objektih

Namembnost objekta	Stopnja širjena požara
Stanovanjski objekt	Srednje
Pisarne	Srednje
Trgovina	Hitro
Hotelska recepcija	Srednje
Hotelska soba	Srednje
Galerija	Počasno
Ind. skladišče, delavnica	Izredno hitro

---

---

---

---

---

---

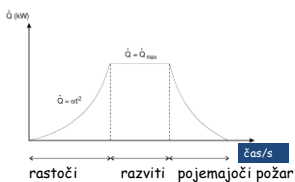
---

---

---

---

## Načrtovanje poteka požara - "predvideni ali pričakovani požar"



Požarno varna gradnja zagotavlja varnost ljudi v objektu in požarno odpornost zgradbe.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Vprašanja

Kako je definirana hitrost gorenja in hitrost sproščanja toplote?  
Zapišite in razložite splošni enačbi. Od česa je odvisna hitrost gorenja?

Zakaj je hitrost sproščanja toplote zelo pomembna veličina?

Katera enačba se uporablja pri preskusih materialov?  
Zakaj so pomembni preskusi gorenja?

Kaj vpliva na hitrost gorenja razlite tekočine, zapišite in  
pojasnite enačbo.

Kdaj govorimo o časovno odvisnem požaru? Kako lahko izračunamo  
hitrost sproščanja toplote v tem primeru?

---

---

---

---

---

---

---

---