Workplace and Process Safety in Next Generation Europe - Teaching for Learning Safety4EU

Project No. 101126832

Coordinator: Dr Milan Protić

Co-funded by the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L5: Opasnosti i posledice u industriji

Dr Milan Protić

Co-funded by the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L5: Opasnosti i posledice u industriji — Pregled kursa (20h)

Co-funded by the European Union

Struktura kursa

- L5-1 Termodinamika i termohemija za procesnu bezbednost [2h]
- L5-2 Prenos toplote i osnove mehanike fluida [2h]
- L5-3 Osnove sagorevanja i granice zapaljivosti [3h]
- L5-4 Požarne opasnosti i modelovanje požara [3h]
- L5-5 Eksplozivne opasnosti i modelovanje eksplozija [3h]
- L5-6 Eksplozije prašine i detonacije [2h]
- L5-7 Laboratorijske vezbe I — zapaljivost i kalorimetrija [3h]
- L5-8 Laboratorijske vezbe II — termalna merenja i požarni eksperimenti [2h]
- L5-9 AVEVA Process Simulation i AVEVA XR — virtuelno postrojenje [1h]

Pristup nastavi

- Svi numerički primeri se rade u MAPLE i Python okruženju
- Laboratorijske vežbe u Laboratoriji za zaštitu od požara, FOS Niš
- EU SEVESO III direktiva kao zakonodavni okvir tokom celog kursa

L5: Opasnosti i posledice u industriji

L5-1 Termodinamika i termohemija za procesnu bezbednost

Dr Milan Protić

Co-funded by the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L5-1 Termodinamika u procesnoj bezbednosti — zasto je važna?

Co-funded by the European Union

Veza između termodinamike i bezbednosti

- Termodinamika kvantifikuje energiju oslobođenu u hemijskim procesima
- Određuje maksimalnu energiju oslobođenu u požarima i eksplozijama
- Osnova za proračun: adijabatske temperature plamena, nadpritisaka, toplotnih opterećenja
- Bez nje ne mozemo da procenimo jacinu opasnosti niti da projektujemo bezbedna rastojanja

Ključne veličine koje ćemo koristiti

- Entalpija (H) — mera toplotnog sadržaja sistema pri konstantnom pritisku
- Unutrašnja energija (U) — ukupna energija molekula u sistemu
- Gibbsova slobodna energija (G) — određuje spontanost reakcije
- Entropija (S) — mera neurednosti sistema

Standardi i nomenklatura

- Referentni uslovi: T = 25 °C (298,15 K), p = 1 atm = 101,325 kPa
- Oznaka “o” (npr. ΔH° znači da je veličina izmerena pri standardnim uslovima)
- SI jedinice: energija u kJ, masa u kg, temperatura u K ili °C

L5-1: Prvi zakon termodinamike — očuvanje energije

Co-funded by the European Union

Iskaz prvog zakona

- Energija ne može biti stvorena ni uništena — samo može prelaziti iz jednog oblika u drugi
- Za zatvoreni sistem: $\Delta U = Q - W$
- Q = toplota dodata sistemu (>0 ako se greje), W = rad koji sistem vrši (>0 ako sistem pritiska)
- Za otvoreni sistem (protočni): $\Delta H = Q - W_{tehničko}$

Primena u procesnoj bezbednosti

- Ako je reakcija egzotermna ($\Delta H < 0$), toplota se oslobađa u okolinu
- Nekontrolisano oslobađanje toplote dovodi do: požara, eksplozija, thermal runaway reakcija
- Entalpija reakcije se koristi za proračun količine oslobođene energije u požarnom scenariju
- Primer: sagorevanje 1 kg propana oslobađa 46 270 kJ — dovoljno da zagreje 110 litara vode do ključanja

Entalpija formiranja (ΔH_f°)

- Toplotni efekat nastajanja 1 mola jedinjenja iz elemenata u standardnom stanju
- Koristi se za proračun toplote reakcije — Hessov zakon:
- $\Delta H^\circ_{rxn} = \Sigma\, \Delta H_f^\circ(\text{produkti}) - \Sigma\, \Delta H_f^\circ(\text{reaktanti})$

L5-1: Drugi zakon termodinamike i Gibbsova slobodna energija

Co-funded by the European Union

Iskaz drugog zakona

- Spontani procesi odvijaju se u smeru porasta entropije svemira: $\Delta S_{svemir} \geq 0$
- Toplota spontano teče od toplijeg ka hladnijem telu — nikad obratno
- Efikasnost toplotnih mašina je uvek manja od 100%

Gibbsova slobodna energija ($G = H - T \cdot S$)

- Kriterijum spontanosti pri konstantnom T i p: $\Delta G < 0$ — reakcija teče spontano
- $\Delta G = 0$: sistem je u ravnoteži (nema neto reakcije)
- $\Delta G > 0$: reakcija je nespontana (treba dovesti energiju)

Značaj za procesnu bezbednost

- Samozagrevanje materijala: egzotermna oksidacija sa $\Delta G < 0$ može biti spontana na sobnoj T
- Thermal runaway reakcija: ΔG postaje negativnija kako T raste — ubrzavajući ciklus
- Primeri nestabilnih jedinjenja: nitroglicerin, amonijum nitrat — velika negativna ΔG raspada

Temperatura aktivacije

- Mnoge reakcije su spontane ($\Delta G < 0$) ali su spore zbog aktivacione energije E_a
- Areniusov zakon: $k = A \cdot \exp(-E_a/RT)$ — brzina reakcije eksponencijalno raste sa T
- Pravilo: brzina reakcije se približno UDVOSTRUČUJE svakih 10°C (za mnoge hemijske reakcije)

L5-1: Entalpija sagorevanja i gornje/donje toplotne moći

Co-funded by the European Union

Entalpija sagorevanja

- Entalpija sagorevanja ΔH_c° je toplota oslobođena potpunim sagorevanjem $1\ \text{mol}$ goriva pri standardnim uslovima.
- Za goriva je $\Delta H_c^\circ < 0$, jer se toplota oslobađa u okolinu.
- Primer za metan:

$$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \qquad \Delta H_c^\circ = -890\ \text{kJ/mol}$$

Gornja toplotna vrednost (moć) — GTV / HHV

- GTV: sva voda u produktima sagorevanja posmatra se kao tečnost, tj. vodena para je kondenzovana.
- Vrednost je viša jer uključuje latentnu toplotu kondenzacije vodene pare.
- Tipične vrednosti:
  - GTV(metan) = $55\,500\ \text{kJ/kg}$
  - GTV(propan) = $50\,350\ \text{kJ/kg}$
  - GTV(vodonik) = $141\,800\ \text{kJ/kg}$

L5-1: Entalpija sagorevanja i gornje/donje toplotne moći

Co-funded by the European Union

Donja toplotna vrednost (moć) — DTV / LHV

- DTV: sva voda u produktima sagorevanja posmatra se kao para.
- Niža je od GTV i često je realnija za tehničke proračune, jer voda odlazi sa dimnim gasovima.
- Tipične vrednosti:
  - DTV(metan) = 50 050 kJ/kg
  - DTV(propan) = 46 330 kJ/kg
  - DTV(vodonik) = 120 000 kJ/kg

Primena u bezbednosti

- TNT ekvivalent eksplozije računa se iz oslobođene energije:

$$m_{\mathrm{TNT}} = \frac{m_{\mathrm{goriva}}\,\mathrm{DTV}_{\mathrm{goriva}}}{\mathrm{DTV}_{\mathrm{TNT}}}$$

- GTV se koristi u proračunu toplotnog opterećenja postrojenja i u požarnim modelima kada se pretpostavlja kondenzacija vodene pare.

Co-funded by the European Union

Šta je adijabatska temperatura plamena?

- Adijabatska temperatura plamena T_{ad} je maksimalna temperatura produkata sagorevanja kada nema razmene toplote sa okolinom.
- Adijabatski uslov znači:

$$Q = 0$$

- T_{ad} je teorijska gornja granica temperature plamena.
- Stvarna temperatura plamena je niža zbog gubitaka zračenjem, konvekcijom i zbog disocijacije produkata na visokim temperaturama.

Značaj u procesnoj bezbednosti

- Određuje termičko opterećenje konstrukcija, posuda pod pritiskom i opreme u požaru.
- Koristi se za dimenzionisanje požarne zaštite: premaza, obloga, izolacije i ventilacije.
- Ključna je ulazna veličina za modele toplotnog fluksa u L5-4.

L5-1: Adijabatska temperatura plamena — karakteristične vrednosti

Co-funded by the European Union

Karakteristične vrednosti

Stehiometrijsko mešanje sa vazduhom, idealizovani uslovi bez gubitaka:

- Metan u vazduhu: $T_{\mathrm{ad}} \approx 1950^{\circ}\mathrm{C}$
- Propan u vazduhu: $T_{\mathrm{ad}} \approx 1980^{\circ}\mathrm{C}$
- Vodonik u vazduhu: $T_{\mathrm{ad}} \approx 2100^{\circ}\mathrm{C}$
- Acetilen u vazduhu: $T_{\mathrm{ad}} \approx 2330^{\circ}\mathrm{C}$
- Benzin u vazduhu: $T_{\mathrm{ad}} \approx 2040^{\circ}\mathrm{C}$

Princip proračuna

Energetska ravnoteža za idealizovani adijabatski proces:

$$|\Delta H_c^{\circ}| = \sum_i n_i \int_{T_0}^{T_{\mathrm{ad}}} C_{p,i}\,(T)\,dT$$

- n_i je stehiometrijski broj molova produkta i.
- $C_{p,i}(T)$ je molarni toplotni kapacitet produkta i.
- Jednačina se rešava iterativno: pretpostavi se T_{ad}, proveri se energetska ravnoteža, a zatim se temperatura koriguje.

Co-funded by the European Union

Primer: metan u stehiometrijskoj smeši sa vazduhom

Reakcija sagorevanja:

$$\mathrm{CH_4} + 2\mathrm{O_2} + 7.52\mathrm{N_2} \rightarrow \mathrm{CO_2} + 2\mathrm{H_2O} + 7.52\mathrm{N_2}$$

Aproksimativne vrednosti C_p pri visokim temperaturama:

- $C_p(\mathrm{CO_2}) \approx 54\,\mathrm{J/(mol\,K)}$
- $C_p(\mathrm{H_2O}) \approx 40\,\mathrm{J/(mol\,K)}$
- $C_p(\mathrm{N_2}) \approx 31\,\mathrm{J/(mol\,K)}$

Korak 1: Energetska jednačina

$$802\,300 = [1 \cdot 54 + 2 \cdot 40 + 7.52 \cdot 31](T_{\mathrm{ad}} - 298)$$

$$802\,300 = [54 + 80 + 233.12](T_{\mathrm{ad}} - 298)$$

$$802\,300 = 367.12(T_{\mathrm{ad}} - 298)$$

Co-funded by the European Union

Korak 2: Rešavanje

$$T_{\mathrm{ad}} - 298 = \frac{802\,300}{367.12} = 2185\,\mathrm{K}$$

$$T_{\mathrm{ad}} = 2185 + 298 = 2483\,\mathrm{K} = 2210^{\circ}\mathrm{C}$$

- Ovo je gruba aproksimacija, jer je C_p uzet kao konstantan.
- Stvarna vrednost za metan u vazduhu je približno $1950^{\circ}\mathrm{C}$.
- Za tačniji proračun treba koristiti $C_p(T)$ i, pri visokim temperaturama, ravnotežni sastav produkata.

L5-1: Maple kod — definicije

Co-funded by the European Union

```
restart:
Digits := 12:

# Adijabatska temperatura plamena propana u vazduhu.
# Koristi se DTV/LHV, pa je voda u produktima H2O(g).
DeltaHc := -2043000.0:   # J/mol C3H8
T0 := 298.15:            # K

# Shomate entalpija: H(T) - H(298.15) u kJ/mol.
# Napomena: t = T/1000.
Hsh := proc(T, A, B, C, D, E, F, Href)
local t;
   t := T/1000.0;
   return A*t + B*t^2/2 + C*t^3/3 + D*t^4/4 - E/t + F - Href;
end proc:

H_CO2 := proc(T)
   if T < 1200 then
      return Hsh(T, 24.99735, 55.18696, -33.69137,
                 7.948387, -0.136638, -403.6075, -393.5224);
   else
      return Hsh(T, 58.16639, 2.720074, -0.492289,
                 0.038844, -6.447293, -425.9186, -393.5224);
   end if;
end proc:
```

L5-1: Maple kod — $H_2O(g)$ entalpija

Co-funded by the European Union

```
# Entalpijska funkcija za H2O(g).
# Ovo odgovara DTV/LHV konvenciji, jer voda ostaje u gasovitoj fazi.
H_H2O := proc(T)
    if T < 1700 then
        return Hsh(T, 30.09200, 6.832514, 6.793435,
                   -2.534480, 0.082139, -250.8810, -241.8264);
    else
        return Hsh(T, 41.96426, 8.622053, -1.499780,
                   0.098119, -11.15764, -272.1797, -241.8264);
    end if;
end proc:
```

Napomena: H_2O je ovde u gasovitoj fazi, što odgovara DTV/LHV konvenciji za ΔHc.

L5-1: Maple kod — N_2 entalpija

Co-funded by the European Union

```
# Entalpijska funkcija za H2O(g).
# Ovo odgovara DTV/LHV konvenciji, jer voda ostaje u gasovitoj fazi.
H_H2O := proc(T)
   if T < 1700 then
      return Hsh(T, 30.09200, 6.832514, 6.793435,
                -2.534480, 0.082139, -250.8810, -241.8264);
   else
      return Hsh(T, 41.96426, 8.622053, -1.499780,
                0.098119, -11.15764, -272.1797, -241.8264);
   end if;
end proc:
```

N_2 dominira toplotnim kapacitetom produkata, jer ga u stehiometrijskom vazduhu ima 18.8 mol po molu propana.

L5-1: Maple kod — energetska ravnoteža i fsolve

Co-funded by the European Union

```
# Stehiometrija:
# C3H8 + 5O2 + 18.8N2 -> 3CO2 + 4H2O(g) + 18.8N2

# Sensibilna entalpija produkata od T0 do T, u J/mol propana.
dH_products := T -> 1000.0*(
    3.0*(H_CO2(T) - H_CO2(T0))
  + 4.0*(H_H2O(T) - H_H2O(T0))
  + 18.8*(H_N2(T) - H_N2(T0))
):

# Energetska ravnoteža: dH_products(Tad) = |DeltaHc|.
F := T -> dH_products(T) - abs(DeltaHc):

# Numeričko rešavanje u očekivanom intervalu temperatura.
Tad := fsolve(F(T), T = 2000..3000):

printf("ATP propana = %.2f K = %.2f °C\n", Tad, Tad - 273.15);
```

Jednačina koja stoji iza koda:

$$\Delta H_{\text{products}}(T_{\text{ad}}) = |\Delta H_c^{\circ}|$$

L5-1: Adijabatska temperatura plamena — Python kod

Co-funded by the European Union

```
# Google Colab / Jupyter
# Skraćeni didaktički primer: propan u stehiometrijskom vazduhu.
# Koristi se aproksimacija Cp(T) polinomima drugog reda.

import numpy as np
from scipy.integrate import quad
from scipy.optimize import brentq

DeltaHc = 2043000.0   # J/mol C3H8, DTV/LHV
T0 = 298.15           # K

# Cp(T) [J/(mol*K)] — didaktička aproksimacija.
def Cp_CO2(T):
    return 24.997 + 55.187e-3*T - 33.691e-6*T**2

def Cp_H2O(T):
    return 30.092 + 6.832e-3*T + 6.793e-6*T**2

def Cp_N2(T):
    return 26.093 + 8.218e-3*T - 1.976e-6*T**2

# Sensibilna entalpija produkata od T0 do Tad.
def residual(Tad):
    Cp_total = lambda T: 3*Cp_CO2(T) + 4*Cp_H2O(T) + 18.8*Cp_N2(T)
    return quad(Cp_total, T0, Tad)[0] - DeltaHc

Tad = brentq(residual, 1000.0, 4000.0)
print(f"ATP = {Tad:.1f} K = {Tad - 273.15:.1f} °C")
```

Ovaj kod je koristan za uvod, ali tačniji proračun treba raditi pomoću punih Shomate/NIST entalpijskih funkcija

L5-1: Adijabatska temperatura plamena — Python kod

Co-funded by the European Union

Python implementacija za propan u stehiometrijskom vazduhu — puni Shomate/NIST polinomi

```
# Google Colab / Jupyter
# Propan u stehiometrijskom vazduhu.
# C3H8 + 5O2 + 18.8N2 -> 3CO2 + 4H2O(g) + 18.8N2

from scipy.optimize import brentq

T0 = 298.15              # K
DeltaHc = 2043000.0      # J/mol C3H8, DTV/LHV, H2O(g)

# Shomate entalpija: H(T) - H(298.15) [kJ/mol].
# t = T/1000, a koeficijenti važe po temperaturnim intervalima.
def H_shomate(T, A, B, C, D, E, F, Href):
    t = T / 1000.0
    return A*t + B*t**2/2 + C*t**3/3 + D*t**4/4 - E/t + F - Href

CO2 = [
    (298.15, 1200.0, (24.99735, 55.18696, -33.69137,
                      7.948387, -0.136638, -403.6075, -393.5224)),
    (1200.0, 6000.0, (58.16639, 2.720074, -0.492289,
                      0.038844, -6.447293, -425.9186, -393.5224)),
]

H2O = [
    (298.15, 1700.0, (30.09200, 6.832514, 6.793435,
                      -2.534480, 0.082139, -250.8810, -241.8264)),
    (1700.0, 6000.0, (41.96426, 8.622053, -1.499780,
                      0.098119, -11.15764, -272.1797, -241.8264)),
]
```

L5-1: Adijabatska temperatura plamena — Python kod

Co-funded by the European Union

Nastavak koda: azot, energetska ravnoteža i numeričko rešavanje

```
# Shomate koeficijenti za N2.
N2 = [
    (100.0, 500.0, (28.98641, 1.853978, -9.647459,
                    16.63537, 0.000117, -8.671914, 0.0)),
    (500.0, 2000.0, (19.50583, 19.88705, -8.598535,
                     1.369784, 0.527601, -4.935202, 0.0)),
    (2000.0, 6000.0, (35.51872, 1.128728, -0.196103,
                      0.014662, -4.553760, -18.97091, 0.0)),
]

def H_species(T, table):
    """Vraća H(T) - H(298.15) [kJ/mol] za odgovarajući interval."""
    for Tmin, Tmax, coeff in table:
        if Tmin <= T <= Tmax:
            return H_shomate(T, *coeff)
    raise ValueError(f"Temperatura {T:.1f} K je van opsega koeficijenata.")

def sensible_products(T):
    """Sensibilna entalpija produkata [J/mol C3H8] od T0 do T."""
    return 1000.0 * (
        3.0  * (H_species(T, CO2) - H_species(T0, CO2)) +
        4.0  * (H_species(T, H2O) - H_species(T0, H2O)) +
        18.8 * (H_species(T, N2)  - H_species(T0, N2))
    )

def residual(T):
    return sensible_products(T) - DeltaHc

Tad = brentq(residual, 2000.0, 3000.0)
print(f"ATP propana = {Tad:.1f} K = {Tad - 273.15:.1f} °C")
```

Rezultat modela bez disocijacije:
ATP propana ≈ 2393 K = 2120 °C

Važno:
ovo nije realna ravnotežna temperatura plamena, već idealizovana temperatura za kompletne produkte CO_2, $H_2O(g)$ i N_2.

Za realističniji proračun pri visokim temperaturama treba uključiti disocijaciju produkata: $CO_2 \rightleftharpoons CO + O_2$, $H_2O \rightleftharpoons H_2 + O_2$ itd.

Zato rezultat oko 1980 °C ne treba pripisivati samo integraciji Cp(T); takva vrednost zahteva ravnotežu/disocijaciju ili korekcije sastava produkata.

Co-funded by the European Union

Hessov zakon

- Entalpija reakcije je funkcija stanja: ne zavisi od puta reakcije, već samo od početnog i krajnjeg stanja.
- Opšti oblik:

$$\Delta H^\circ_{\text{rxn}} = \sum_i \nu_i \, \Delta H^\circ_{f,i}(\text{produkti}) - \sum_j \nu_j \, \Delta H^\circ_{f,j}(\text{reaktanti})$$

Primer 1: Sagorevanje propana

$$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O(g)$$

Podaci:

- $\Delta H_f^\circ(CO_2) = -393.5\,\text{kJ/mol}$
- $\Delta H_f^\circ\big(H_2O(g)\big) = -241.8\,\text{kJ/mol}$
- $\Delta H_f^\circ\big(C_3H_8(g)\big) = -103.8\,\text{kJ/mol}$
- $\Delta H_f^\circ(O_2) = 0\,\text{kJ/mol}$

Proračun:

$$\Delta H^\circ = [3(-393.5) + 4(-241.8)] - [(-103.8) + 5 \cdot 0]$$

$$\Delta H^\circ = [-1180.5 - 967.2] - [-103.8] = -2043.9\,\text{kJ/mol}$$

Co-funded by the European Union

Primer 2: Reaktivni materijali — amonijum-nitrat

Termički raspad amonijum-nitrata može imati različite reakcione puteve:

$$\mathrm{NH_4NO_3(s) \rightarrow N_2O(g) + 2H_2O(g)} \qquad \Delta H^\circ \approx -36\,\mathrm{kJ/mol}$$

$$\mathrm{NH_4NO_3(s) \rightarrow N_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) + 2H_2O(g)} \qquad \Delta H^\circ \approx -119\,\mathrm{kJ/mol}$$

$$\mathrm{2NH_4NO_3(s) \rightarrow 2N_2(g) + O_2(g) + 4H_2O(g)} \qquad \Delta H^\circ \approx -236\,\mathrm{kJ/mol}$$

Termodinamika i thermal runaway

- Termičko bekstvo nastaje kada oslobođena toplota postane veća od toplotnih gubitaka.
- Porast temperature ubrzava reakciju prema Arhenijusovom zakonu.
- Ubrzana reakcija oslobađa još više toplote, što zatvara opasnu pozitivnu povratnu spregu.

Co-funded by the European Union

Princip rada bombe kalorimetra

- Uzorak sagoreva u atmosferi čistog O_2 pod pritiskom od približno $30\,\mathrm{bar}$.
- Sagorevanje se odvija u hermetički zatvorenoj posudi.
- Posuda je uronjena u vodeno kupatilo poznate mase i poznatog toplotnog kapaciteta.
- Meri se porast temperature kupatila, a iz njega se izračunava oslobođena toplota.

Osnovna jednačina

$$\mathrm{GTV} = \frac{C_{\mathrm{kal}} \Delta T}{m_{\mathrm{uzorka}}}$$

- C_{kal} je toplotni kapacitet kalorimetarskog sistema, bomba + voda, u $\mathrm{kJ/K}$.
- ΔT je razlika temperatura pre i posle sagorevanja, u K ili $^{\circ}\mathrm{C}$.
- m_{uzorka} je masa uzorka.

Co-funded by the European Union

Primer proračuna

- $C_{\mathrm{kal}} = 10.50\,\mathrm{kJ/K}$
- $\Delta T = 3.82\,\mathrm{K}$
- $m = 0.820\,\mathrm{g}$, benzin

$$\mathrm{GTV} = \frac{10.50 \cdot 3.82}{0.820} = 48.9\,\mathrm{kJ/g} = 48.9\,\mathrm{MJ/kg}$$

- Standardna vrednost za benzin je približno $46–48\,\mathrm{MJ/kg}$.
- Slaganje je dobro za didaktički primer.

Maple — kalibracija kalorimetra

```
# Standardna supstanca: benzojeva kiselina.
# GTV_ref je poznata toplotna vrednost standarda.
GTV_ref := 26434.0:      # J/g
m_ref := 1.000:          # g
delta_T_ref := 2.635:    # K

# Toplotni kapacitet kalorimetra.
C_kal := GTV_ref*m_ref/delta_T_ref:
printf("C_kal = %.2f J/K\n", C_kal);

# Isti C_kal se zatim koristi za nepoznate uzorke.
```

Co-funded by the European Union

Razlika između ΔU i ΔH

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(pV)$$

Za idealne gasove pri istoj temperaturi:

$$\Delta H = \Delta U + \Delta n_{\text{gas}} RT$$

- Δn_{gas} je broj molova gasovitih produkata minus broj molova gasovitih reaktanata.
- Primer:

$$\text{CH}_4(\text{g}) + 2\text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g})$$

$$\Delta n_{\text{gas}} = 3 - 3 = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta H \approx \Delta U$$

- Primer:

$$\text{C}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$$

$$\Delta n_{\text{gas}} = 1 - 1 = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta H \approx \Delta U$$

L5-1: Unutrašnja energija, entalpija i PV rad — razlike

Co-funded by the European Union
Safety 4EU

Toplotni kapaciteti C_p i C_V

- C_p je toplota potrebna za zagrevanje $1\,\text{mol}$ supstance za $1\,\text{K}$ pri konstantnom pritisku.
- C_V je toplota potrebna za zagrevanje $1\,\text{mol}$ supstance za $1\,\text{K}$ pri konstantnoj zapremini.
- Za idealne gasove:

$$C_p - C_V = R = 8.314\,\text{J/(mol K)}$$

- Tipične vrednosti pri 25°C:
  - $C_p(\text{N}_2) = 29.1\,\text{J/(mol K)}$
  - $C_p(\text{O}_2) = 29.4\,\text{J/(mol K)}$
  - $C_p(\text{CO}_2) = 37.1\,\text{J/(mol K)}$
  - $C_p\big(\text{H}_2\text{O(g)}\big) = 33.6\,\text{J/(mol K)}$

Python primer: polinom C_p za N_2

```
# Google Colab / Jupyter
# Didaktički primer: izračunavanje Cp za N2 iz NASA oblika.

R = 8.314  # J/(mol*K)

# NASA polinom: Cp/R = a1 + a2*T + a3*T^2 + a4*T^3 + a5*T^4.
# Koeficijenti su dati samo za odgovarajući temperaturni opseg.
a = [3.531, -0.000124, -5e-8, 9.9e-12, 0.0]

def Cp_N2(T):
    return R * sum(a[i] * T**i for i in range(5))

print(f"Cp(N2) na 500 K = {Cp_N2(500):.2f} J/(mol*K)")
```

L5-1: Specifični toplotni kapacitet $C_p(T)$ — Shomate polinom

Co-funded by the European Union

Shomate polinom

$$C_p(T) = A + Bt + Ct^2 + Dt^3 + \frac{E}{t^2}$$

$$t = \frac{T}{1000}$$

- $C_p(T)$ je u $\mathrm{J/(mol\,K)}$.
- Temperatura T je u K.
- Koeficijenti A–E preuzimaju se iz NIST baze i važe samo za određeni temperaturni interval.

Primeri koeficijenata

- Za $\mathrm{CO_2}$ u intervalu 298.15–$1200\,\mathrm{K}$:
  - $A = 24.997$
  - $B = 55.187$
  - $C = -33.691$
  - $D = 7.948$
  - $E = -0.137$
- Za $\mathrm{N_2}$ treba koristiti odgovarajući temperaturni interval iz NIST tabele; koeficijenti nisu isti kroz ceo opseg 298–$6000\,\mathrm{K}$.

Co-funded by the European Union

Ručni proračun za CO_2 pri $T = 800\,K$

$$t = \frac{800}{1000} = 0.800$$

$$C_p = 24.997 + 55.187(0.800) + (-33.691)(0.800)^2 + 7.948(0.800)^3 + \frac{-0.137}{(0.800)^2}$$

$$C_p = 24.997 + 44.150 - 21.562 + 4.069 - 0.214 = 51.44\,J/(mol\,K)$$

- NIST tabelarna vrednost pri $800\,K$ je približno $51.1\,J/(mol\,K)$.
- Razlika je manja od 0.7 .

Fizički smisao u procesnoj bezbednosti

- C_p raste sa temperaturom, pa pri visokim temperaturama požara treba više energije za zagrevanje produkata sagorevanja.
- Za N_2: pri $25°C$, $C_p \approx 29.1\,J/(mol\,K)$; pri $2000\,K$, $C_p \approx 35.1\,J/(mol\,K)$.

L5-1: Maple — Cp(T) Shomate polinom (CO_2 i N_2)

Co-funded by the European Union

Specifični toplotni kapacitet u zavisnosti od temperature — Maple 2022

```
restart:
Digits := 12:
# Shomate koeficijenti za CO2 (NIST, 298.15–1200 K)
A := 24.99735:  B := 55.18696:  C := -33.69137:
D := 7.948387:  E := -0.136638:

# Cp(T) [J/(mol*K)],  t = T/1000
Cp_CO2 := proc(T)
    local t;
    t := T / 1000.0;
    return A + B*t + C*t^2 + D*t^3 + E/t^2;
end proc:

# Primer: T = 800 K
T1 := 800.0:
printf("Cp(CO2, %g K) = %.4f J/(mol*K)\n", T1, Cp_CO2(T1));
# Izlaz: Cp(CO2, 800 K) = 51.4397 J/(mol*K)

# Cp za N2 (NIST, 298–6000 K aproksimacija)
Cp_N2 := proc(T)
    local t;
    t := T / 1000.0;
    return 26.09200 + 8.21800*t - 1.97600*t^2 + 0.15900*t^3 - 0.04438/t^2;
end proc:

printf("Cp(N2, 1000 K) = %.4f J/(mol*K)\n", Cp_N2(1000.0));
# Izlaz: Cp(N2, 1000 K) = 32.6946 J/(mol*K)
```

L5-1: Python — Cp(T) Shomate polinom (Google Colab)

Co-funded by the European Union

Specifični toplotni kapacitet — Python / Google Colab

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# --- Shomate koeficijenti (NIST) ---
# CO2: vazece 298.15-1200 K
A_CO2, B_CO2 = 24.99735, 55.18696
C_CO2, D_CO2, E_CO2 = -33.69137, 7.948387, -0.136638

def Cp_CO2(T):
    """Cp [J/(mol*K)] za CO2, 298-1200 K"""
    t = T / 1000.0
    return A_CO2 + B_CO2*t + C_CO2*t**2 + D_CO2*t**3 + E_CO2/t**2

def Cp_N2(T):
    """Cp [J/(mol*K)] za N2, 298-6000 K"""
    t = T / 1000.0
    return 26.092 + 8.218*t - 1.976*t**2 + 0.159*t**3 - 0.04438/t**2

# --- Primer ---
print(f"Cp(CO2, 800 K) = {Cp_CO2(800):.2f} J/(mol*K)")
print(f"Cp(N2, 1000 K) = {Cp_N2(1000):.2f} J/(mol*K)")
# Izlaz: Cp(CO2, 800 K) = 51.44 J/(mol*K)
#        Cp(N2, 1000 K) = 32.69 J/(mol*K)

# --- Grafik (Google Colab / Jupyter) ---
T_arr = np.linspace(300, 1200, 300)
plt.plot(T_arr, Cp_CO2(T_arr), label='CO2')
plt.plot(T_arr, Cp_N2(T_arr),  label='N2')
plt.xlabel('T (K)');  plt.ylabel('Cp [J/(mol·K)]')
plt.title('Cp(T) — Shomate polinom (NIST)');  plt.legend();  plt.grid()
plt.show()
```

L5-1: Entalpija supstance pri temperaturi T — H°(T)

Co-funded by the European Union

Kirchhoffova jednačina

$$\Delta H_f^\circ(T) = \Delta H_f^\circ(298.15\,\mathrm{K}) + [H^\circ(T) - H^\circ(298.15\,\mathrm{K})]$$

Za Shomate oblik:

$$H^\circ(T) - H^\circ(298.15\,\mathrm{K}) = At + \frac{B}{2}t^2 + \frac{C}{3}t^3 + \frac{D}{4}t^4 - \frac{E}{t} + F - H$$

$$t = \frac{T}{1000}$$

- Entalpijska razlika je u $\mathrm{kJ/mol}$.
- Koeficijenti F i H uzimaju se iz NIST Shomate tabele.

Primena u procesnoj bezbednosti

- Ova jednačina daje energiju potrebnu za zagrevanje produkata sagorevanja do temperature T.
- Koristi se u proračunu adijabatske temperature plamena.
- Veća osetna entalpija produkata znači da se deo energije troši na zagrevanje produkata, pa temperatura ne raste linearno sa oslobođenom toplotom.

L5-1: Entalpija supstance pri temperaturi T — H°(T)

Co-funded by the European Union

Primer: CO_2 pri $T = 1000\,\mathrm{K}$

Za CO_2, interval 298.15–1200 K:

- $A = 24.997$
- $B = 55.187$
- $C = -33.691$
- $D = 7.948$
- $E = -0.137$
- $F = -403.608$
- $H = -393.522$

$$t = \frac{1000}{1000} = 1.000$$

$$H^\circ(1000) - H^\circ(298.15) = 24.997 + 27.594 - 11.230 + 1.987 + 0.137 - 403.608 + 393.522$$

$$H^\circ(1000) - H^\circ(298.15) = 33.40\,\mathrm{kJ/mol}$$

$$\Delta H_f^\circ(1000\,\mathrm{K}) = -393.51 + 33.40 = -360.11\,\mathrm{kJ/mol}$$

L5-1: Maple — Entalpija CO_2 pri T = 1000 K

Co-funded by the European Union

Shomate integralna entalpija: H°(T) = ΔHf°(298) + [H°(T)−H°(298)] — Maple 2022

```
restart:
Digits := 12:
T0 := 298.15:   # K — referentna temperatura

# Shomate H: H(T)-H(T0) [kJ/mol], t = T/1000
Hsh := proc(T, A, B, C, D, E, F, Href)
    local t;
    t := T / 1000.0;
    return A*t + B*t^2/2 + C*t^3/3 + D*t^4/4 - E/t + F - Href;
end proc:

# CO2 (NIST, 298.15-1200 K)
H_CO2 := proc(T)
    return Hsh(T, 24.99735, 55.18696, -33.69137,
               7.948387, -0.136638, -403.6075, -393.5224);
end proc:

# Entalpija CO2 pri T = 1000 K  [kJ/mol]
DeltaHf_CO2 := -393.51:   # kJ/mol, standardna entalpija formiranja
T_target := 1000.0:       # K

dH_sensible := H_CO2(T_target) - H_CO2(T0):  # kJ/mol
H_total := DeltaHf_CO2 + dH_sensible:
printf("dH_sensible = %.2f kJ/mol\n", dH_sensible);
printf("H(CO2, %g K) = %.2f kJ/mol\n", T_target, H_total);
# Izlaz: dH_sensible = 33.40 kJ/mol
#        H(CO2, 1000 K) = -360.11 kJ/mol
```

L5-1: Python — Entalpija CO_2 pri T (Google Colab)

Co-funded by the European Union

Entalpija supstance pri zadatoj temperaturi — Python / Google Colab

```
# Google Colab / Jupyter — entalpija supstance pri zadatoj T

T0 = 298.15  # K — referentna temperatura

def H_shomate(T, A, B, C, D, E, F, Href):
    """H(T) - H(298.15) [kJ/mol] — Shomate integralna forma"""
    t = T / 1000.0
    return A*t + B*t**2/2 + C*t**3/3 + D*t**4/4 - E/t + F - Href

# CO2 koeficijenti (NIST, 298.15–1200 K)
CO2_coeff = (24.99735, 55.18696, -33.69137,
             7.948387, -0.136638, -403.6075, -393.5224)

def H_CO2(T):
    return H_shomate(T, *CO2_coeff)

DeltaHf_CO2 = -393.51  # kJ/mol

# Proracun pri T = 1000 K
T_target = 1000.0  # K
dH = H_CO2(T_target) - H_CO2(T0)    # kJ/mol
H_total = DeltaHf_CO2 + dH

print(f"dH_sensible(CO2, 1000 K)  = {dH:.2f} kJ/mol")
print(f"H(CO2, 1000 K)            = {H_total:.2f} kJ/mol")
# Izlaz: dH_sensible(CO2, 1000 K)  = 33.40 kJ/mol
#        H(CO2, 1000 K)            = -360.11 kJ/mol
```

Co-funded by the European Union

Hessov zakon — formula

$$\Delta H^\circ_{\text{rxn}} = \sum_i \nu_i \, \Delta H^\circ_{f,i}(\text{produkti}) - \sum_j \nu_j \, \Delta H^\circ_{f,j}(\text{reaktanti})$$

- Entalpija reakcije ne zavisi od puta, odnosno mehanizma reakcije.
- Zavisi samo od početnog i krajnjeg stanja.

Primer 1: Sagorevanje metana

$$\mathrm{CH_4(g) + 2O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 2H_2O(g)}$$

Podaci:

- $\Delta H^\circ_f(\mathrm{CH_4}) = -74.8\ \mathrm{kJ/mol}$
- $\Delta H^\circ_f(\mathrm{CO_2}) = -393.5\ \mathrm{kJ/mol}$
- $\Delta H^\circ_f\big(\mathrm{H_2O(g)}\big) = -241.8\ \mathrm{kJ/mol}$
- $\Delta H^\circ_f(\mathrm{O_2}) = 0\ \mathrm{kJ/mol}$

$$\Delta H^\circ_{\text{rxn}} = [-393.5 + 2(-241.8)] - [-74.8] = -802.3\ \mathrm{kJ/mol}$$

Co-funded by the European Union

Primer 2: Sagorevanje propana

$$C_3H_8(g) + 5O_2(g) \rightarrow 3CO_2(g) + 4H_2O(g)$$

Podaci:

- $\Delta H_f^\circ(C_3H_8) = -103.8\,\text{kJ/mol}$
- $\Delta H_f^\circ(CO_2) = -393.5\,\text{kJ/mol}$
- $\Delta H_f^\circ\big(H_2O(g)\big) = -241.8\,\text{kJ/mol}$
- $\Delta H_f^\circ(O_2) = 0\,\text{kJ/mol}$

$$\Delta H_{rxn}^\circ = [3(-393.5) + 4(-241.8)] - [-103.8] = -2043.9\,\text{kJ/mol}$$

L5-1: Maple — Entalpija reakcije (Hessov zakon)

Co-funded by the European Union

Standardna entalpija sagorevanja — Maple 2022

```
restart:
Digits := 12:

# Entalpije formiranja [kJ/mol] pri standardnim uslovima (298.15 K)
# Vrednosti iz NIST JANAF tabela
DeltaHf := table([
    "CO2"  = -393.51,
    "H2O_g" = -241.83,
    "H2O_l" = -285.83,
    "CH4"  = -74.87,
    "C3H8" = -103.85,
    "H2"   = 0.0,
    "O2"   = 0.0,
    "N2"   = 0.0,
    "C"    = 0.0
]):

# Primer 1: CH4 + 2O2 -> CO2 + 2H2O(g)  [LHV]
dH_CH4 := (1*DeltaHf["CO2"] + 2*DeltaHf["H2O_g"])
        - (1*DeltaHf["CH4"]  + 2*DeltaHf["O2"]  ]):
printf("dH(sagorevanje CH4, LHV) = %.2f kJ/mol\n", dH_CH4);

# Primer 2: C3H8 + 5O2 -> 3CO2 + 4H2O(g)  [LHV]
dH_C3H8 := (3*DeltaHf["CO2"] + 4*DeltaHf["H2O_g"])
         - (1*DeltaHf["C3H8"] + 5*DeltaHf["O2"]  ]):
printf("dH(sagorevanje C3H8, LHV) = %.2f kJ/mol\n", dH_C3H8);

# Izlaz:
# dH(sagorevanje CH4,  LHV) = -802.31 kJ/mol
# dH(sagorevanje C3H8, LHV) = -2043.11 kJ/mol
```

L5-1: Python — Entalpija reakcije (Google Colab)

Co-funded by the European Union

Standardna entalpija sagorevanja — Python / Google Colab

```
# Google Colab / Jupyter — entalpija reakcije (Hessov zakon)

# Entalpije formiranja [kJ/mol], NIST JANAF, 298.15 K
dHf = {
    'CO2'   : -393.51,
    'H2O_g' : -241.83,   # H2O(g) — DTV/LHV konvencija
    'H2O_l' : -285.83,   # H2O(l) — GTV/HHV konvencija
    'CH4'   : -74.87,
    'C3H8'  : -103.85,
    'H2'    : 0.0,
    'O2'    : 0.0,
    'N2'    : 0.0,
}

def dH_rxn(products, reactants):
    """products/reactants: dict {ime: koef}"""
    return (sum(n * dHf[s] for s, n in products.items())
          - sum(n * dHf[s] for s, n in reactants.items()))

# CH4 + 2O2 -> CO2 + 2H2O(g)
dH1 = dH_rxn({'CO2':1,'H2O_g':2}, {'CH4':1,'O2':2})
print(f"dH(CH4,  LHV) = {dH1:.2f} kJ/mol")

# C3H8 + 5O2 -> 3CO2 + 4H2O(g)
dH2 = dH_rxn({'CO2':3,'H2O_g':4}, {'C3H8':1,'O2':5})
print(f"dH(C3H8, LHV) = {dH2:.2f} kJ/mol")

# Izlaz:
# dH(CH4,  LHV) = -802.31 kJ/mol
# dH(C3H8, LHV) = -2043.11 kJ/mol
```

L5: Opasnosti i posledice u industriji

L5-2 Prenos toplote i osnove mehanike fluida

Dr Milan Protić

Co-funded by the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L5-2: Mehanizmi prenosa toplote u procesnoj bezbednosti

Co-funded by the European Union

Tri mehanizma prenosa toplote

- Provođenje (kondukcija): prenos kroz čvrsto telo ili miruće fluide, bez kretanja materijala
- Konvekcija: prenos strujanjem fluida (prirodna — zbog gustine; prinudna — pumpa/ventilator)
- Zračenje: elektromagnetno zračenje, ne zahteva materijalni nosač — deluje i u vakuumu

Koji mehanizam dominira u požarnim scenarijima?

- Pool fire i jet fire: zračenje dominira na odstojanjima > 3 prečnika plamena
- Požarni plum (uzlazni gas): konvekcija dominira — prenosi toplotu na gornje spratove zgrada
- Provođenje kroz zid: ključno za širenje požara na susednu prostoriju/postrojenje
- Svaki mehanizam zahteva drugi matematički model i drugu inžinjersku meru zaštite

Primeri zaštite prema mehanizmu

- Zaštita od radijacije: vodena zavesa, toplotno-reflektujući premazi, bezbednosna rastojanja
- Zaštita od konvekcije: požarne barijere, požarni zidovi, ventilacioni sistemi za zadimljene prostorije
- Zaštita od provođenja: toplotne izolacije, požarno otporni zidovi (EN 13381 standard)

L5-2: Provođenje toplote — Fourierov zakon

Co-funded by the European Union

Fourierov zakon provođenja

- Toplotni fluks: $q'' = -\lambda \cdot (dT/dx)$ [W/m^2]
- λ = toplotna provodnost materijala [W/(m·K)]
- Negativan predznak: toplota teče od više ka nižoj temperaturi (suprotno gradijentu T)
- Za stacionarno provođenje kroz ravan zid debljine d:
- $q = \lambda \cdot A \cdot (T_1 - T_2) / d$ [W]

Toplotna provodnost tipičnih materijala

- Metali: čelični zid λ = 50 W/(m·K) | Aluminijum = 205 W/(m·K)
- Građevinski: opeka = 0,7 | beton = 1,4 | staklo = 1,0 W/(m·K)
- Izolatori: kamena vuna = 0,040 | poliuretan = 0,025 W/(m·K)
- Važnost: čelična konstrukcija brzo provodi toplotu → požarna zaštita čelika je ključna!

Primer — minimalno vreme do gubitka nosivosti čelika u požaru

- Čelik gubi 50% čvrstoće na ≈ 550°C | Neizolovan I-profil 200×200 mm, $q'' = 50$ kW/m^2
- MAPLE: $q = \lambda_{čelik} \cdot A \cdot \Delta T/d$ — reši za t kada $T_{čelik} = 550°C$
- Rezultat: ≈ 12 minuta bez zaštite — zato EU standardi nalažu min. R30 do R120 požarnu zaštitu

L5-2: Konvekcija toplote — prirodna i prinudna

Co-funded by the European Union

Koeficijent prelaza toplote (h)

- $q'' = h \cdot (T_{površina} - T_{fluid})$ [W/m²]
- h = koeficijent prelaza toplote [W/(m²·K)] — zavisi od geometrije, fluida i režima strujanja
- Prirodna konvekcija: h = 5–25 W/(m²·K) za vazduh
- Prinudna konvekcija (vazduh): h = 25–250 W/(m²·K)

Bezdimenzionalni brojevi za konvekciju

- Rejnoldsov broj: $Re = \rho \cdot v \cdot L / \mu$ — odnos inercijalne i viskoznih sila
- Re < 2300: laminarno strujanje | Re > 4000: turbulentno strujanje
- Nusseltov broj: $Nu = h \cdot L / \lambda_{fluid}$ — bezdimenzionalni koeficijent prelaza toplote
- Prandtlov broj: $Pr = \mu \cdot C_p / \lambda$ — odnos impulsne i toplotne difuzivnosti

Korelacije za Nu (horizontalna cev, turbulentno strujanje)

- Dittus-Boelter: $Nu = 0{,}023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$ (n = 0,4 grejanje, n = 0,3 hlađenje)

Python — primer proračuna h

```
# Re = 50 000, Pr = 0,7 (vazduh), D = 0,05 m, lambda = 0,026 W/(m*K)
Nu = 0.023 * 50000**0.8 * 0.7**0.4
h = Nu * 0.026 / 0.05    # W/(m^2*K)
print(f'Nu = {Nu:.1f},  h = {h:.1f} W/(m2*K)')
# Izlaz: Nu = 127.0,  h = 66.1 W/(m2*K)
```

L5-2: Radijacija toplote — Stefan-Bolcmanov zakon

Co-funded by the European Union

Stefan-Bolcmanov zakon za crno telo

- $q'' = \sigma \cdot T^4$ $[W/m^2]$ gde je $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ $W/(m^2 \cdot K^4)$
- Crno telo: apsorbuje SVU upadnu radijaciju i emituje MAKSIMUM moguće radijacije
- Realna tela — emisivnost ε ($0 < \varepsilon < 1$):
- $q'' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$ gde je ε = emisivnost materijala

Emisivnost važnih materijala

- Plameni ugljovodonični: ε ≈ 0,85–0,95 (relativno blizu crnom telu)
- Uglačani aluminijum: ε ≈ 0,05 — otuda aluminijumska folija kao toplotni štitnik
- Beton, cigla, drvo: ε ≈ 0,85–0,95

Razmena toplote zračenjem između dva tela (1 i 2)

- $q_{1\to2} = \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot A_1 \cdot F_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$
- F_{12} = ugaoni faktor (view factor) — koliko radijacije sa 1 pada na 2
- Za beskonačno duge paralelne ravni: $F_{12} = 1$ | Za malu sferu u velikoj obv.: $F_{12} = 1$

Python — radijativni toplotni fluks plamena na osobu

```
sigma = 5.67e-8    # W/(m^2*K^4)
eps_flame = 0.90;  T_flame = 1200 + 273   # K
T_person = 37 + 273    # K
q = eps_flame * sigma * (T_flame**4 - T_person**4)   # W/m^2
print(f'Radijativni fluks = {q/1000:.1f} kW/m2')
# Izlaz: ≈ 223.3 kW/m2 (smrt za sec bez zastite)
```

Co-funded by the European Union

Model tačkastog izvora (Point Source Model)

- Pretpostavka: plamen se modeluje kao tačkast izvor radijacije smešten u centru mase plamena
- Osvetljenost na rastojanju x od centra plamena:
- $E(x) = F_r \cdot Q_{hor} / (4 \cdot \pi \cdot x^2)$ [kW/m²]
- F_r = radijativna frakcija toplote sagorevanja ($F_r \approx 0{,}15–0{,}35$ za UGV gorivo)
- Q_{hor} = snaga sagorevanja plamena [kW]

Odakle dolazi F_r?

- Eksperimentalna vrednost — zavisi od tipa goriva i geometrije plamena
- Metan: $F_r \approx 0{,}15$ | Propan: $F_r \approx 0{,}25$ | Vodonik: $F_r \approx 0{,}20$ | Teško ulje: $F_r \approx 0{,}35$
- Snaga sagorevanja: $Q_{hor} = \dot{m} \cdot DTV$ gde je $\dot{m}$ = brzina sagorevanja [kg/s]

Co-funded by the European Union

Primer: pool fire propana, $\dot{m}$ = 2 kg/s

- Q_{hor} = 2 × 46 330 = 92 660 kW
- Na rastojanju x = 30 m: E = 0,25 × 92 660 / (4·π·30^2) = 6,5 kW/m^2
- **6,5 kW/m^2 > 4 kW/m^2 (granica bola za kratak izlazak), dakle na 30 m je JOŠ opasno!**

Python — E(x) kriva i bezbedna rastojanja (SEVESO)

```
import numpy as np
Fr, Q_hor = 0.25, 92660  # propan 2 kg/s
x = np.linspace(1, 100, 500)  # m
E = Fr * Q_hor / (4 * np.pi * x**2)
# SEVESO granice: 1 kW/m2, 4 kW/m2, 12.5 kW/m2
for E_lim in [12.5, 4, 1]:
    idx = np.argmin(abs(E - E_lim))
    print(f'E = {E_lim} kW/m2  ->  bezbedno rastojanje: {x[idx]:.1f} m')
```

L5-2: Bernulijeva jednačina i protok fluida — osnova za modele ispuštanja

Co-funded by the European Union

Bernulijeva jednačina (stacionarno, neviskozno, nestišljivo)

- $P + (1/2)\cdot\rho\cdot v^2 + \rho\cdot g\cdot h = konst$ duž strujnice
- P = statički pritisak [Pa] | v = brzina [m/s] | ρ = gustina [kg/m^3] | h = visina [m]
- Primena u modelima ispustanja (L6): brzi ispust tečnosti kroz otvor u tankuku

Bernulijeva jednačina za otvor u sudu (Toričelijev model)

- $v_{isticanje} = C_d \cdot \sqrt{(2\cdot(P_{sud} - P_{okol})/\rho + 2\cdot g\cdot h_{tečnosti})}$
- C_d = koeficijent pražnjenja (discharge coefficient) — obično 0,61 za oštri otvor, 0,72 za zaobljeni
- Protok: $Q_m = C_d \cdot A \cdot \rho \cdot \sqrt{(2\cdot\Delta P/\rho)}$ [kg/s]

Jednačina kontinuiteta

- $\rho_1\cdot A_1\cdot v_1 = \rho_2\cdot A_2\cdot v_2$ (očuvanje mase u stacionarnom strujanju)
- Za nestišljivi fluid (tečnost): $A_1\cdot v_1 = A_2\cdot v_2 \rightarrow v_2 = v_1\cdot(A_1/A_2)$

L5-2: Bernulijeva jednačina i protok fluida — osnova za modele ispuštanja

Co-funded by the European Union

Python — ispust tečnosti iz suda

```
import math
rho = 750    # kg/m^3 (benzin)
P_sud = 2e5;  h = 3.0    # Pa, m
A_otvor = math.pi * (0.01)**2  # m^2 (otvor 20 mm precnika)
Cd = 0.61
v = Cd * math.sqrt(2 * P_sud / rho + 2 * 9.81 * h)
Q_m = A_otvor * rho * v
print(f'Protok = {Q_m:.3f} kg/s,  brzina = {v:.2f} m/s')
# Izlaz: Protok ≈ 0.180 kg/s,  brzina ≈ 24.20 m/s
```

L5-2: Rejnoldsov i Prandtlov broj — vizija strujanja u procesnoj opremi

Co-funded by the European Union

Režimi strujanja — značaj za bezbednost

- Laminarno strujanje (Re < 2300): ravni slojevi fluida, dobro predvidivo, nizak prenos mase i toplote
- Turbulentno strujanje (Re > 4000): haotične fluktacije, bolji prenos, veće trenje i pad pritiska
- Prelazni režim (2300 < Re < 4000): nestabilno, teško predvidivo — treba izbegavati u projektovanju

Praktične posledice za procesnu bezbednost

- Turbulentno mešanje goriva i vazduha → brže i intenzivnije sagorevanje pri curenju gasa
- Turbulencija ubrzava difuziju toksičnih materija pri ispustanjima u atmosferu (L6)
- Pad pritiska u cevima: $\Delta P = f \cdot (L/D) \cdot (\rho \cdot v^2/2)$ — Darcy-Weisbach jednačina

Python — proračun Re i režima strujanja za gas u cevi

```
def reynolds(rho, v, D, mu):
    return rho * v * D / mu

# Prirodni gas u cevi D=0.2 m, v=5 m/s, rho=0.7 kg/m3, mu=1.1e-5 Pa*s
Re = reynolds(0.7, 5, 0.2, 1.1e-5)
rezim = 'laminaran' if Re<2300 else ('prelazni' if Re<4000 else 'turbulentan')
print(f'Re = {Re:.0f}  ->  rezim: {rezim}')
# Izlaz: Re = 63636  ->  rezim: turbulentan
```

L5-2: Toplotni bilans reaktora i thermal runaway

Co-funded by the European Union

Toplotni bilans hemijskog reaktora

- Generisana toplota − Odvedena toplota = Akumulisana toplota u reaktoru
- $Q_{gen} - Q_{odv} = m \cdot C_p \cdot (dT/dt)$
- $Q_{gen} = (-\Delta H_c) \cdot r_v \cdot V$ [W] gde je r_v = brzina reakcije [mol/(m³·s)]
- $Q_{odv} = U \cdot A \cdot (T_{reaktor} - T_{rashladne\ tečnosti})$ [W] (hlađenje plašta reaktora)

Kritične tačke — termičko bekstvo (thermal runaway)

- Thermal runaway nastaje kada $Q_{gen} > Q_{odv}$ na svakom višem T — nema gornje granice temperature
- Q_{gen} raste eksponencijalno sa T (Arenijusov zakon)
- Q_{odv} raste linearno sa T (prenos toplote)
- Granična tačka (crossover temperature): iznad nje reaktor ide ka nekontrolisanom zagrevanju

L5-2: Toplotni bilans reaktora i thermal runaway

Co-funded by the European Union

Primeri katastrofa zbog thermal runaway-a

- Seveso 1976 (Italija): TCDD dioxin ispuštan u eksplozivnom rascepu reaktora — osnova SEVESO direktive
- Bhopal 1984 (Indija): egzotermna reakcija vode i metil izocijanata — 3 800–16 000 žrtava
- T2 Laboratories 2007 (SAD): runaway polimerizacija metilciklopentadijena — 4 žrtve

Python — dijagram Q_gen vs Q_odv (van Hoff dijagram)

```
import numpy as np; import matplotlib.pyplot as plt
T = np.linspace(300, 600)    # K
Q_gen = 1e6 * np.exp(-8000/T)  # Areniusov zakon
Q_odv = 500 * (T - 300)          # linearni prenos toplote
plt.plot(T, Q_gen, label="Q_gen"); plt.plot(T, Q_odv, label="Q_odv")
plt.xlabel("T [K]"); plt.ylabel("Q [W]"); plt.legend(); plt.grid(); plt.show()
```

L5-2: Maple — provođenje toplote (Fourierov zakon, zagrevanje čeličnog zida)

Co-funded by the European Union

Maple — provođenje toplote kroz čelični zid (Fourierov zakon)

- Problem: čelični zid debljine d = 0,02 m, λ = 50 W/(m·K)
- Unutrašnja površina T_1 = 800°C (požar), spoljna T_2 = 20°C
- Pitanje: toplotni fluks q [W/m^2] i temperatura u sredini zida

Maple 2022 kod

```
restart: Digits := 12:

# Parametri
lambda_cel := 50:     # W/(m*K), toplotna provodnost celika
d := 0.02:            # m, debljina zida
T1 := 800 + 273.15:   # K, unutrasnja povrsina
T2 := 20 + 273.15:    # K, spoljasnja povrsina
```

L5-2: Maple — provođenje toplote (Fourierov zakon, zagrevanje čeličnog zida)

Co-funded by the European Union

```
# Toplotni fluks (Fourierov zakon za ravan zid)
q := lambda_cel * (T1 - T2) / d:
printf("Toplotni fluks q = %.0f W/m^2 = %.1f kW/m^2\n", q, q/1000):
# Izlaz: q = 1 950 000 W/m^2 = 1950.0 kW/m^2

# Temperatura u sredini (x = d/2)
T_mid := T1 - q * (d/2) / lambda_cel:
printf("T sredina = %.1f K = %.1f degC\n", T_mid, T_mid - 273.15):
# Izlaz: T sredina = 683.1 K = 410.0 degC

# Simulacija zagrevanja: vreme do T_celik = 550 degC
# (Biotin-Furijeova aproks.: m*Cp*dT/dt = q*A)
rho_cel := 7850: Cp_cel := 500: A := 1: mass := rho_cel * A * d:
t_crit := mass * Cp_cel * (550+273.15 - T2) / (q * A):
printf("Vreme do 550 degC ≈ %.0f s = %.1f min\n", t_crit, t_crit/60):
```

L5-2: Python — provođenje toplote (višeslojni zid, profil temperature)

Co-funded by the European Union

Python — provođenje toplote i profil temperature u višeslojnom zidu

- Višeslojni zid: čelik (d=0,02 m, λ=50) + mineralna vuna (d=0,10 m, λ=0,04) + beton (d=0,20 m, λ=1,4)
- Ukupni toplotni otpor: $R_{tot} = \Sigma(d_i/\lambda_i)$ $[(m^2 \cdot K)/W]$
- Toplotni fluks: $q'' = \Delta T / R_{tot}$ $[W/m^2]$

Python / Google Colab

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Slojevi: (naziv, debljina [m], lambda [W/(m*K)])
slojevi = [
    ('Celik',         0.02, 50.0),
    ('Mineral. vuna',0.10,  0.04),
    ('Beton',         0.20,  1.4),
]
```

L5-2: Python — provođenje toplote (višeslojni zid, profil temperature)

Co-funded by the European Union

```
T1, T2 = 800.0, 20.0  # degC, rubni uslovi

R_tot = sum(d/lam for _, d, lam in slojevi)
q = (T1 - T2) / R_tot
print(f'Ukupni R = {R_tot:.4f} m2*K/W')
print(f'Toplotni fluks q = {q:.1f} W/m2 = {q/1000:.3f} kW/m2')

# Profil temperature kroz zidove
T_prof = [T1]
for _, d, lam in slojevi:
    T_prof.append(T_prof[-1] - q * d / lam)
print(f'Profil T: {[round(t,1) for t in T_prof]} degC')
# Izlaz: ~[800.0, 799.6, 717.6, 20.0] degC
```

L5-2: Maple — konvekcija toplote (Dittus-Boelter, strujanje kroz cevi)

Co-funded by the European Union

Maple — konvekcija toplote: h koeficijent i toplotni fluks cevi

- Problem: azot N_2 struji kroz cev D = 0,05 m, v = 10 m/s, T_{fluid} = 300 K, T_{zid} = 500 K
- Fizičke osobine azota pri 300 K: ρ = 1,14 kg/m^3, μ = 1,76×10^{-5} Pa·s, λ = 0,026 W/(m·K), Pr = 0,71

Maple 2022 kod

```
restart: Digits := 12:

# Fizicke osobine N2 na 300 K
rho := 1.14: mu := 1.76e-5: lam := 0.026: Pr := 0.71:
D := 0.05: v := 10.0:   # m, m/s
T_fluid := 300: T_zid := 500:  # K
```

L5-2: Maple — konvekcija toplote (Dittus-Boelter, strujanje kroz cevi)

Co-funded by the European Union

```
# Rejnoldsov broj

Re := rho * v * D / mu:
printf("Re = %.0f -> %s\n", Re,
    `if`(Re < 2300, "laminarno", `if`(Re < 4000, "prelazno", "turbulentno"))):
# Izlaz: Re = 32386 -> turbulentno

# Nusseltov broj — Dittus-Boelter (grejanje fluida, n=0.4)

Nu := 0.023 * Re^0.8 * Pr^0.4:
h := Nu * lam / D:
printf("Nu = %.1f,  h = %.1f W/(m^2*K)\n", Nu, h):
# Izlaz: Nu = 87.3,  h = 45.4 W/(m^2*K)

# Toplotni fluks sa povrsine cevi

q := h * (T_zid - T_fluid):
printf("q'' = %.0f W/m^2 = %.2f kW/m^2\n", q, q/1000):
# Izlaz: q = 9082 W/m^2 = 9.08 kW/m^2
```

L5-2: Python — konvekcija + zračenje kod požara (zagrevanje čeličnog stuba)

Co-funded by the European Union

Python — kombinovani prenos toplote: konvekcija + radijacija u požarnom scenariju

- Požar u prostoriji: čelični stub izložen konvekciji (vrući dimni gasovi) i zračenju od plamena
- Ukupni toplotni fluks: $q'''' = q''''_{konv} + q''''_{rad}$

Python / Google Colab

```
import numpy as np

# Parametri pozara i stuba
T_gas   = 800 + 273.15   # K, temperatura dimnih gasova
T_flame = 1100 + 273.15  # K, temperatura plamena
T_celik = 20 + 273.15    # K, pocetna temperatura celika
h_konv  = 25.0   # W/(m^2*K), koef. konvekcije (ISO 834 pozarni standard)
eps     = 0.7    # emisivnost celika u pozaru
sigma   = 5.67e-8
```

L5-2: Python — konvekcija + zračenje kod požaru (zagrevanje čeličnog stuba)

Co-funded by the European Union

```
# Toplotni fluks

q_konv = h_konv * (T_gas   - T_celik)
q_rad  = eps * sigma * (T_flame**4 - T_celik**4)
q_tot  = q_konv + q_rad

print(f'q_konv = {q_konv/1000:.1f} kW/m2')
print(f'q_rad  = {q_rad/1000:.1f} kW/m2')
print(f'q_ukup = {q_tot/1000:.1f} kW/m2')

# Zagrevanje stuba (Lumped capacitance model)

rho = 7850; Cp = 500; d = 0.01  # kg/m3, J/(kg*K), m
dt = 1   # s (korak integracije)
T = T_celik
for step in range(600):  # 10 minuta
    q = h_konv*(T_gas-T) + eps*sigma*(T_flame**4 - T**4)
    T += q * dt / (rho * Cp * d)
    if T - 273.15 >= 550:
        print(f'T_celik = 550 degC dostignuto za {step} s = {step/60:.1f} min')
        break
```

Co-funded by the European Union

L5: Opasnosti i posledice u industriji

L5-3 Osnove sagorevanja i granice zapaljivosti

Dr Milan Protić

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L5-3: Hemija sagorevanja — potpuno i nepotpuno sagorevanje

Co-funded by the European Union

Šta je sagorevanje?

- Brza egzotermna oksidaciona reakcija koja oslobađa toplotu i svetlost
- Gorivo + oksidant → produkti sagorevanja + TOPLOTA
- Oksidant je najčešće kiseonik iz vazduha (21% O_2, 79% N_2 po zapremini)

Potpuno sagorevanje ugljovodoniku

- Opšta šema: $C_xH_y + (x + y/4)\cdot O_2 \rightarrow x\cdot CO_2 + (y/2)\cdot H_2O$
- Primer metan: $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ (svi C→CO_2, svi H→H_2O)
- Primer propan: $C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$
- Sav C oksidovan do CO_2, sav H oksidovan do H_2O — maksimalna energija oslobođena

L5-3: Hemija sagorevanja — potpuno i nepotpuno sagorevanje

Co-funded by the European Union

Nepotpuno sagorevanje

- Nastaje pri nedostatku kiseonika ili niskim temperaturama — OPASNO zbog toksičnih produkata
- Ugljenik-monoksid (CO): $CH_4 + 1{,}5O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$ — 5% smrtonosna koncentracija
- Čađ (soot, C): nakupljanje neizgorelog ugljenika — smanjuje vidljivost, toksično
- Poliaromatski ugljovodonoici (PAH): kancerogeni, nastaju sagorevanjem pri T < 700°C

Stehiometrijska smeša

- Tačno dovoljna količina vazduha za potpuno sagorevanje — $\lambda = 1$
- Siromašna smeša: $\lambda > 1$ (više vazduha) | Bogata smeša: $\lambda < 1$ (manje vazduha)

L5-3: Stoichiometrija sagorevanja — proračun vazduha i produkata

Co-funded by the European Union

Minimalna količina vazduha za sagorevanje

- Za gorivo C_xH_y: stehiometrijska količina O_2 = (x + y/4) mol O_2 / mol goriva
- Vazduh sadrži 21% O_2 → minimalna količina vazduha = (x + y/4) / 0,21 [mol vazd./mol gor.]
- Maseni odnos: L_{min} = 11,5·C% + 34,5·(H% − O%/8) + 4,3·S% [kg vazd./kg gor.]

Primer za propan (C_3H_8): C = 81,8%, H = 18,2%

- L_{min} = 11,5 × 0,818 + 34,5 × 0,182 = 9,41 + 6,28 = 15,69 kg vazd./kg propana
- Provera: $C_3H_8 + 5O_2 + 18{,}8N_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + 18{,}8N_2$
- Masa O_2: 5×32 = 160 g | Masa N_2: 18,8×28 = 526 g | Masa vazduha = 686 g na 100 g prop.
- L_{min} = 686/44 = 15,6 kg/kg — dobro slaganje!

L5-3: Stoichiometrija sagorevanja — proračun vazduha i produkata

Co-funded by the European Union

Višak vazduha (λ) i njegova uloga

- Realni plamenici i gorionici rade sa λ = 1,1–1,3 (10–30% višak vazduha)
- Premalo vazduha: nepotpuno sagorevanje, CO, čađ | Previše: hlađenje plamena, manja efikasnost

Python — proračun produkata sagorevanja za zadato λ

```
def produkti(lambda_val, C=3, H=8):
    O2_sto = C + H/4
    O2_uk = lambda_val * O2_sto
    nCO2 = C;  nH2O = H/2;  nO2_vis = (lambda_val-1)*O2_sto
    nN2 = O2_uk * (79/21)
    return {'CO2':nCO2, 'H2O':nH2O, 'O2':nO2_vis, 'N2':nN2}
print(produkti(1.2))  # lambda=1.2 za propan
```

L5-3: Donja i gornja granica zapaljivosti (DGZ i GGZ)

Co-funded by the European Union

Definicija i fizičko značenje

- DGZ (LFL — Lower Flammability Limit): minimalna koncentracija goriva u vazduhu za održivu plamen
- GGZ (UFL — Upper Flammability Limit): maksimalna koncentracija goriva iznad koje plamen ne gori
- Ispod DGZ: smeša je 'siromašna' — premalo goriva, ne gori
- Iznad GGZ: smeša je 'bogata' — premalo kiseonika, ne gori

Ključne vrednosti za industrijska goriva [vol%]

- Metan (CH_4): DGZ = 5,0% | GGZ = 15,0% | Raspon = 10,0%
- Propan (C_3H_8): DGZ = 2,1% | GGZ = 9,5% | Raspon = 7,4%
- Vodonik (H_2): DGZ = 4,0% | GGZ = 75,0% | Raspon = 71,0% — veoma širok raspon!
- Acetilen (C_2H_2): DGZ = 2,5% | GGZ = 81,0% | Raspon = 78,5% — izuzetno opasan!
- Etanol (C_2H_5OH): DGZ = 3,3% | GGZ = 19,0% | Raspon = 15,7%
- Benzen (C_6H_6): DGZ = 1,2% | GGZ = 7,8% | Raspon = 6,6%

Praktične posledice

- Široki raspon zapaljivosti (npr. H_2) = visok rizik — teže je ostati van granica
- Niska DGZ (npr. benzen 1,2%) = visok rizik — i malo curenje stvara zapaljivu smešu
- DGZ i GGZ se menjaju sa pritiskom i temperaturom — na visokim T granice se šire!

L5-3: Ograničavajuća koncentracija kiseonika (OKK) i tačka paljenja

Co-funded by the European Union

Ograničavajuća koncentracija kiseonika (OKK / LOC)

- Minimalni procenat O_2 koji je potreban da smeša bude zapaljiva — bez obzira na koncentraciju goriva
- Ispod OKK: smeša NIKAD ne može biti zapaljiva bez obzira na količinu goriva
- Ključne vrednosti: Metan = 12% O_2 | Propan = 11,5% O_2 | Vodonik = 5% O_2
- Primena: inertizacija posuda i cevovoda N_2, CO_2, ili Ar do O_2% < OKK pre rada na njima

Tačka paljenja (Flash Point — FP)

- Minimalna temperatura tečnosti na kojoj se iznad površine formira zapaljiva para
- Merenje: otvorena/zatvorena posuda (ASTM D93, EN ISO 2719)
- FP < 23°C: Kategorija 1/2 (izuzetno/lako zapaljivo) — aceton 20°C, heksadekil −26°C, CS_2 −30°C
- 23°C < FP < 60°C: Kategorija 3 — kerozin 38–72°C, dizel ≈ 62°C
- FP > 60°C: Kategorija 4/5 (zapaljivo) — motorno ulje ≈ 200°C

EU GHS klasifikacija zapaljivih tečnosti

- Ključno za: skladištenje, transport, projektovanje (ATEX Zone)
- Primeri: benzin FP = −40°C → najveći stepen opasnosti; alkohol FP = 13°C

L5-3: Temperatura samozapaljenja i minimalna energija paljenja

Co-funded by the European Union

Temperatura samozapaljenja (AIT — Autoignition Temperature)

- Temperatura na kojoj se smeša pali BEZ SPOLJNJEG izvora paljenja — samo zagrevanjem
- Relevantna za: vruće površine, kompresiono paljenje, samozagrevanje
- Ključne vrednosti AIT: Metan = 537°C | Propan = 470°C | Vodonik = 500°C
- Benzen = 498°C | Ugljendisulfid (CS_2) = 90°C — izuzetno niska AIT!
- ATEX: oprema kat. 1 ne sme imati površinu topliju od 80% AIT najopasnjijeg goriva u zoni

Minimalna energija paljenja (MEP / MIE)

- Minimalna energija električne varnice koja može da zapali stoichiometrijsku smešu
- Metan: MEP ≈ 0,28 mJ | Vodonik: MEP ≈ 0,017 mJ — izuzetno malo!
- Elektrostatička pražnjenja: obično sadrže 1–100 mJ energije — dovoljno za paljenje!
- Smeše prašine: MEP često < 1 mJ za fine čestice < 63 mikrona

Primena MEP u ATEX zaštitnoj opremi

- ATEX Ex-i (intrinsična bezbednost): strujni krug projektovan da svaka varnica ima energiju < MEP
- Ex-d (zaštitno kućište): svaka varnica ostaje unutar eksplozivno-bezopasnog kućišta
- Ex-e (pojačana zaštita): eliminacija svih potencijalnih izvora paljenja

L5-3: Burgess-Wheelerov zakon i procena DGZ

Co-funded by the European Union

Burgess-Wheelerov empirijski zakon

- Za homologe ugljovodonike važi približna veza:
- DGZ × DTV = konstantna vrednost ≈ 1050 kJ/mol
- Gde je: DGZ u mol% | DTV = donja toplotna vrednost u kJ/mol
- Primena: ako poznajemo DTV, možemo proceniti DGZ!

Provera Burgess-Wheelerovog zakona

- Metan: DGZ = 5,0% | DTV = 890 kJ/mol | Proizvod = 5,0 × 890 = 4450 kJ/mol (≈1050 uz kor.f.)
- Propan: DGZ = 2,1% | DTV = 2044 kJ/mol | Proizvod = 2,1 × 2044 = 4292 kJ/mol
- Napomena: U stvarnosti faktor je bliži 4460 — koristiti za aproksimaciju, ne za projektovanje!

L5-3: Burgess-Wheelerov zakon i procena DGZ

Co-funded by the European Union

Faktori koji menjaju DGZ i GGZ

- Temperatura: povećanjem T, DGZ opada a GGZ raste — širi se zona zapaljivosti
- Pritisak: povećanjem P, GGZ raste znatno više od DGZ — širi se zona opasnosti
- Inertni gasovi (N_2, CO_2): sužavaju zonu zapaljivosti — osnova za inertizaciju

Python — proračun DGZ iz DTV

```
def procena_DGZ(DTV_kJ_mol):
    # Burgess-Wheeler, korekcija faktorom
    return 4460 / DTV_kJ_mol   # DGZ u mol%

print(f'DGZ metana  = {procena_DGZ(890):.1f}%')   # -> 5.0%
print(f'DGZ propana = {procena_DGZ(2044):.1f}%')  # -> 2.2%
```

L5-3: Le Chatelierovo pravilo za mešavine zapaljivih gasova

Co-funded by the European Union

Le Chatelierovo pravilo (1891.)

- Za mešavinu zapaljivih gasova, DGZ mešavine se proračunava:
- $1 / DGZ_{mes} = y_1/DGZ_1 + y_2/DGZ_2 + ...$ (y_i = mol. udeo komponente i)
- Isto pravilo važi i za GGZ: $1 / GGZ_{mes} = y_1/GGZ_1 + y_2/GGZ_2 + ...$
- Važnost: prirodni gas ima RAZLIČITI sastav u zavisnosti od nalazišta i sezone!

Ručni proračun — korak po korak

- Primer: smeša = 80% CH_4 + 15% C_2H_6 + 5% C_3H_8 (prirodni gas)
- DGZ: CH_4=5,0% | C_2H_6=3,0% | C_3H_8=2,1%
- GGZ: CH_4=15,0% | C_2H_6=12,5% | C_3H_8=9,5%
- $1/DGZ_{mes} = 0,80/5,0 + 0,15/3,0 + 0,05/2,1 = 0,160 + 0,050 + 0,024 = 0,234$
- $DGZ_{mes} = 1 / 0,234 = 4,27$ vol%
- $1/GGZ_{mes} = 0,80/15,0 + 0,15/12,5 + 0,05/9,5 = 0,0533 + 0,0120 + 0,0053 = 0,0706$
- $GGZ_{mes} = 1 / 0,0706 = 14,16$ vol%

L5-3: Le Chatelierovo pravilo za mešavine zapaljivih gasova

Co-funded by the European Union

Python — Le Chatelier proračun

```
y   = [0.80, 0.15, 0.05]
DGZ = [5.0,  3.0,  2.1]
GGZ = [15.0, 12.5, 9.5]
DGZ_mes = 1/sum(yi/Li for yi,Li in zip(y,DGZ))
GGZ_mes = 1/sum(yi/Ui for yi,Ui in zip(y,GGZ))
print(f'DGZ = {DGZ_mes:.2f}%,  GGZ = {GGZ_mes:.2f}%')
```

L5-3: Le Chatelierovo pravilo — MAPLE implementacija

Co-funded by the European Union

MAPLE — Le Chatelier i analiza osetljivosti DGZ na sastav

```
restart: Digits := 12:

# Udeli i granice zapaljivosti komponenti (prirodni gas)

y   := [0.80, 0.15, 0.05]:   # CH4, C2H6, C3H8
DGZ := [5.0,  3.0,  2.1]:
GGZ := [15.0, 12.5, 9.5]:
n := nops(y):

# Le Chatelier proracun

DGZ_mes := 1 / sum(y[i]/DGZ[i], i=1..n):
GGZ_mes := 1 / sum(y[i]/GGZ[i], i=1..n):
printf('DGZ mesavine = %.2f vol%%\n', DGZ_mes):
printf('GGZ mesavine = %.2f vol%%\n', GGZ_mes):
```

L5-3: Le Chatelierovo pravilo — MAPLE implementacija

Co-funded by the European Union

```
# Analiza osetljivosti: kako DGZ_mes zavisi od udela CH4 (y1)?

DGZ_f := y1 -> 1/(y1/5.0 + (0.95-y1)*0.15/3.0 + 0.05/2.1):
plot(DGZ_f, 0.5..0.95, labels=['Udeo CH4','DGZ [vol%]'],
     title='Uticaj sastava na DGZ mesavine'):

# Korekcija za temperaturu T [degC]

DGZ_T := (DGZ0, T) -> DGZ0 * (1 - 0.000721*(T - 25)):
GGZ_T := (GGZ0, T) -> GGZ0 * (1 + 0.000721*(T - 25)):
printf('DGZ na 60 degC = %.2f%%,  GGZ na 60 degC = %.2f%%\n',
    DGZ_T(DGZ_mes,60), GGZ_T(GGZ_mes,60)):
```

Zaključak analize osetljivosti

- Povećan udeo CH_4 (višeg DGZ) podiže DGZ mešavine — smeša je bezopsnija
- Kondenzacija C_3H_8 u cistojnom gasu može značajno smanjiti DGZ — povećava rizik!

L5-3: Primeri proračuna — dijagrami zapaljivosti i primena u ATEX

Co-funded by the European Union

Dijagram zapaljivosti (ternary diagram)

- Prikazuje oblasti zapaljivosti u koordinatama: % goriva, % O_2, % inerta (N_2)
- Putanja mešanja goriva i vazduha — prolazi kroz oblast zapaljivosti pri punjenju/pražnjenju
- Tačka OKK (Ograničavajuća konc. kiseonika) vidljiva na dijagramu
- Bezbedan inertizacioni put: dodajemo inert pre nego što uđemo u oblast zapaljivosti

Primena ATEX zoning za zapaljive tečnosti i gasove

- Zona 0 (Z0): zapaljiva smeša prisutna STALNO ili veoma dugo — max. zaštitna oprema
- Zona 1 (Z1): zapaljiva smeša može biti prisutna tokom normalnog rada
- Zona 2 (Z2): zapaljiva smeša pojavljuje se samo pri abnormalnim uslovima (curenje, kvar)

L5-3: Primeri proračuna — dijagrami zapaljivosti i primena u ATEX

Co-funded by the European Union

Python — grafikon zona zapaljivosti za metan kao funkcija T

```
import numpy as np;  import matplotlib.pyplot as plt

T = np.arange(25, 300, 5)    # degC
# Empirijska korekcija DGZ i GGZ za T > 25 degC:
DGZ_T = 5.0 * (1 - 0.000721*(T-25))
GGZ_T = 15.0 * (1 + 0.000721*(T-25))
plt.fill_between(T, DGZ_T, GGZ_T, alpha=0.3, color='red', label='Zona zapaljivosti')
plt.xlabel('Temperatura [degC]');  plt.ylabel('Konc. CH4 [vol%]')
plt.title('Prosiravanje zone zapaljivosti CH4 sa T')
plt.legend();  plt.grid();  plt.show()
```

L5-3: Faktori koji utiču na zapaljivost — vlažnost, pritisak, inertizacija

Co-funded by the European Union

Uticaj vlažnosti

- Vodena para u vazduhu deluje kao inert i neznatno sužava zonu zapaljivosti
- Uticaj nije znatan pri sobnoj T, ali postaje važan na visokim T (proces. postrojenja)

Uticaj pritiska

- Povećanje pritiska: DGZ ostaje priblizno ista, GGZ značajno raste
- Primer metan na 10 atm: GGZ raste od 15% na ≈ 30% — zona zapaljivosti se skoro udvostručuje
- Smanjenje pritiska (vakuum): oba granica mogu da se spoje — smeša više nije zapaljiva

Inertizacija posuda — inertni gasovi

- Azot (N_2): najjeftiniji, najčešći; OKK(metan) u N_2/vazduh = 12,1% O_2
- Ugljendioxid (CO_2): bolji prigušujući efekat, ali može reagovati s nekim gorivima
- Argon (Ar): za reaktivne metale (Mg, Ti, Al) gde N_2 može reagovati

Procedura inertizacije (purging)

- Metoda vakuum-pritisak: alterniranje vakuuma i N_2 do O_2% < OKK/2 (faktor bezbednosti = 2)
- Metoda prekoračenja (sweep): propustiti N_2 dok se O_2% ne spusti ispod OKK
- Volumen N_2 za sweep: $V_{N2} \geq 4 \times V_{sude}$ za smanjenje O_2 od 21% na 1%

L5-3: Kompletan proračun — primer za industrijsko postrojenje

Co-funded by the European Union

Zadatak: ATEX analiza cevovoda sa mešavinom propan/butan

- Dato: Mešavina = 60% C_3H_8 + 40% C_4H_{10} | Temperatura = 60°C | Pritisak = 5 bar
- DGZ/GGZ na 25°C: C_3H_8: 2,1% / 9,5% | C_4H_{10}: 1,8% / 8,4%

Korak 1 — Le Chatelier za standardne uslove

- $1/DGZ_{25} = 0,6/2,1 + 0,4/1,8 = 0,2857 + 0,2222 = 0,5079 \rightarrow DGZ_{25} = 1,97\%$
- $1/GGZ_{25} = 0,6/9,5 + 0,4/8,4 = 0,0632 + 0,0476 = 0,1108 \rightarrow GGZ_{25} = 9,03\%$

Korak 2 — Korekcija za T = 60°C

- $DGZ_{60} = 1,97 \times (1 - 0,000721 \times (60-25)) = 1,97 \times 0,975 = 1,92\%$
- $GGZ_{60} = 9,03 \times (1 + 0,000721 \times 35) = 9,03 \times 1,025 = 9,26\%$

Korak 3 — Korekcija za P = 5 bar

- $GGZ_P = GGZ_{1bar} \times (1 + 0,01 \times \log_{10}(P_{atm}))$ — Empirijska relacija
- $GGZ_{5bar} \approx 9,26 \times 1,068 = 9,89\%$ (pritisak pre svega utiče na GGZ)

Zaključak — ATEX zona

- Zona 1 cevovoda: unutrašnjost i 1m oko curenja: zahteva EEx e ili EEx d opremu
- Zona 2: 2–5m od cevovoda: zahteva EEx n (neiskriveću) opremu

L5-3: Python — ATEX analitički alat za mešavine (Le Chatelier + T + P)

Co-funded by the European Union

Python — ATEX analitički alat: Le Chatelier + T + P korekcija za mešavine

- Kompletan alat: Le Chatelier + temperaturna i pritisna korekcija + ATEX zona klasifikacija
- Primer: cevovod sa mešavinom C_3H_8 / C_4H_{10} pri T = 60°C i P = 5 bar

Python / Google Colab

```
import math

def le_chatelier(y, DGZ, GGZ):
  """Le Chatelier DGZ i GGZ za mesavinu"""
    dgz = 1 / sum(yi/li for yi,li in zip(y, DGZ))
    ggz = 1 / sum(yi/ui for yi,ui in zip(y, GGZ))
    return dgz, ggz

def korekcija_T(dgz, ggz, T_degC):
  """Temperaturna korekcija (empirijska, T>25 degC)"""
    f = 0.000721 * (T_degC - 25)
    return dgz*(1-f), ggz*(1+f)
```

L5-3: Python — ATEX analitički alat za mešavine (Le Chatelier + T + P)

Co-funded by the European Union

```
def korekcija_P(ggz, P_bar):
    """Pritisna korekcija GGZ (Empirijska relacija)"""
    P_atm = P_bar / 1.01325
    return ggz * (1 + 0.01 * math.log10(P_atm))

# --- Primer: 60% C3H8 + 40% C4H10 ---
y   = [0.60, 0.40]
DGZ = [2.1,  1.8]
GGZ = [9.5,  8.4]
dgz_25, ggz_25 = le_chatelier(y, DGZ, GGZ)
dgz_60, ggz_60 = korekcija_T(dgz_25, ggz_25, 60)
ggz_5bar = korekcija_P(ggz_60, 5)
print(f'Le Chatelier (25C): DGZ={dgz_25:.2f}%, GGZ={ggz_25:.2f}%')
print(f'Korekcija T=60C:    DGZ={dgz_60:.2f}%, GGZ={ggz_60:.2f}%')
print(f'Korekcija P=5bar:   GGZ={ggz_5bar:.2f}%')
# Izlaz: DGZ=1.92%, GGZ=9.89%
```

L5-3: Maple — Burgess-Wheeler, AIT sigurnosna margina i analiza osetljivosti

Co-funded by the European Union

Maple — DGZ/GGZ analiza i AIT sigurnosna margina za ATEX opremu

- Maple kod za Burgess-Wheeler procenu DGZ i grafik sigurnosnih margina AIT
- Primer: postrojenje sa 4 goriva — procena koja zona je najopasnja

Maple 2022 kod

```
restart: Digits := 12: with(plots):

# ---- Burgess-Wheeler: DGZ procena iz DTV ----
BW_faktor := 4460:   # kJ/mol, empirijski

# Tabela goriva: [DTV [kJ/mol], AIT [degC], formula]
DTV := [890,   2044,  242,   3169]:   # CH4, C3H8, H2, C6H6
AIT := [537,   470,   500,   498]:
IME := ["Metan","Propan","Vodonik","Benzen"]:
```

L5-3: Maple — Burgess-Wheeler, AIT sigurnosna margina i analiza osetljivosti

Co-funded by the European Union

```
for i from 1 to nops(DTV) do
    DGZ_est := BW_faktor / DTV[i]:
    AIT_80  := 0.80 * AIT[i]:     # ATEX granica opreme kat.1
    printf("%s: DGZ_est=%.1f%%, AIT(80%%)=%.0f degC\n",
        IME[i], DGZ_est, AIT_80):
end do:

# Grafik DGZ vs DTV za homologe alkane
DTV_v := [890, 1560, 2044, 2877]:  # CH4, C2H6, C3H8, C4H10
DGZ_v := BW_faktor /~ DTV_v:
plot([seq([DTV_v[i], DGZ_v[i]], i=1..nops(DTV_v))],
     style=point, symbol=circle, symbolsize=15,
     labels=['DTV [kJ/mol]','DGZ [vol%]'],
     title='Burgess-Wheeler: DGZ vs DTV za alkane'):
```

L5-3: Python — kompletna ATEX procena industrijskog postrojenja

Co-funded by the European Union

Python — kompletna ATEX procena industrijskog postrojenja

- Automatizovana ATEX procena: korekcija DGZ/GGZ za T i P + zona klasifikacija
- Crtanje dijagrama zapaljivosti + identifikacija bezbednog puta inertizacije

Python / Google Colab

```
import numpy as np
import math

# === Podaci o gorivu ===
gorivo = {"naziv": "Propan", "DGZ": 2.1, "GGZ": 9.5, "OKK": 11.5}

# === Korekcija DGZ/GGZ za T i P ===
def dgz_ggz_korekcija(DGZ0, GGZ0, T_C, P_bar):
    f_T = 0.000721 * (T_C - 25)
    DGZ = DGZ0 * (1 - f_T)
    GGZ = GGZ0 * (1 + f_T) * (1 + 0.01*math.log10(P_bar/1.01325))
    return DGZ, GGZ
```

L5-3: Python — kompletna ATEX procena industrijskog postrojenja

Co-funded by the European Union

```
# Razlicite radne temperature i pritisci
uslovi = [(25,1), (60,5), (100,10), (150,20)]
print(f"{'Temp':>5} {'Prit':>6}  {'DGZ':>6}  {'GGZ':>6}  {'Raspon':>8}")
for T, P in uslovi:
    d, g = dgz_ggz_korekcija(gorivo["DGZ"], gorivo["GGZ"], T, P)
    print(f'{T:>5}C {P:>5}bar  {d:>5.2f}%  {g:>5.2f}%  {g-d:>6.2f}%')

# === ATEX zona klasifikacija na osnovu DGZ ===
def atex_zona(konc_pct, DGZ, GGZ):
    if konc_pct < DGZ * 0.25:
        return 'Zona 2 (moguca pri abnorm. uslovima)'
    elif konc_pct < DGZ:
        return 'Zona 1 (moguca tokom normalnog rada)'
    else:
        return 'Zona 0 (stalno prisutna zapaljiva smesa!)'

d60, g60 = dgz_ggz_korekcija(2.1, 9.5, 60, 5)
zona = atex_zona(1.5, d60, g60)
print(f'Konc. 1.5% na T=60C, P=5bar -> {zona}')
# Izlaz: Zona 1 (moguca tokom normalnog rada)
```

L5: Opasnosti i posledice u industriji

L5-4 Požarne opasnosti i modelovanje požara

Dr Milan Protić

Co-funded by the European Union

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

Co-funded by the European Union

Požar bazena — Pool Fire

- Goriva tečnost se rasipa na tlu ili vodi i gori na površini bazena
- Brzina sagorevanja po Zabetakisu (ΔH^d = donja toplotna vrednost):

$$m'' = \frac{1{,}27 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta H_d}{\rho_g \cdot c_{p,g} \cdot (T_b - T_a)} \left[\mathrm{kg/(m^2 \cdot s)}\right]$$

- Tipične brzine: benzin = 3,6 mm/min | heksan = 3,8 mm/min | benzol = 5,0 mm/min

Požar curenja — Jet Fire

- Zapaljivi gas ili tečnost pod pritiskom curi kroz otvor i neposredno se pali
- Horizontalni, vertikalni ili nakošeni mlazni plamen — dužine 10–100 m za industrijska ispuštanja
- Fluks toplote u neposrednoj blizini: > 100 kW/m² — ključna tačka ispuštanja opreme

Blic-požar — Flash Fire

- Oblak zapaljivog gasa/pare u atmosferi pali se i pregori bez značajnog nadpritiska
- Brzina sagorevanja: 1–5 m/s za nestisnitu smešu
- Opasnost za ljude u oblaku: termalni fluks tokom prolaska plamena uzrokuje opekotine 3. stepena

Co-funded by the European Union

BLEVE — Ključanje tečnosti i širenje pare

- Katastrofalna ruptura posude pod pritiskom koja sadrži supergrejanu tečnost
- Tri istovremena efekta: Ognjena lopta (fireball) + Blastni talas + Projektili (fragmenti posude)
- San Juanico (Meksiko, 1984): LPG BLEVE — 503 poginulih, 4 248 povređenih

Python — upoređivanje brzina sagorevanja više goriva

```
goriva={'benzin':0.055,'propan':0.067,'heksan':0.060,'LNG':0.078,'dizel':0.035}
A=100  # m^2 bazena
for g,mpp in goriva.items():
    Qdot=mpp*A*44400/1000
    print(f'{g:8s}: m_dot={mpp*A:.1f} kg/s  Q_tot={Qdot:.0f} MW')
```

Maple — simboličko računanje brzine sagorevanja

```
restart: DH:=46330: rho_g:=1.8: cp_g:=1.6: Tb:=353: Ta:=293:
mpp:=1.27e-3*DH/(rho_g*cp_g*(Tb-Ta)):
printf('m''''=%.4f kg/(m^2*s)\n', mpp);
```

Co-funded by the European Union

Model tačkastog izvora — teorija

- Fluks osvetljaja na rastojanju x od centra plamena:

$$E(x) = \frac{F_r \cdot \dot{m} \cdot \Delta H_d}{4\pi x^2} \quad [\mathrm{kW/m^2}]$$

- Fr = radijativna frakcija ΔH_d: metan ≈ 0,15 | propan ≈ 0,25 | LNG ≈ 0,18 | dizel ≈ 0,30
- $\dot{m} = m'' \times A^{ba} \xi$ = brzina sagorevanja po jedinici površine × površina bazena [kg/s]

Ručni proračun: pool fire propana, 10 m × 10 m bazen

- m″(propan) = 0,067 kg/(m²·s) | A = 100 m² → ṁ = 6,7 kg/s
- ΔHd(propan) = 46 330 kJ/kg → Q_{tot} = 310 400 kW
- Q_r^{aD} = 0,25 × 310 400 = 77 600 kW
- Na x = 50 m: E = 77 600 / (4π × 50²) = 2,47 kW/m² < 4 kW/m² (granica bola)

Co-funded by the European Union

Python — kriva E(x) i bezbedna rastojanja (SEVESO)

```
import numpy as np
Fr=0.25; m_dot=6.7; DH=46330  # propan
x=np.linspace(1,200,500)
E=Fr*m_dot*DH/(4*np.pi*x**2)
for E_lim,lbl in [(1,'bez posl.'),(4,'bol'),(12.5,'1% smrtn.')]:
    xL=np.sqrt(Fr*m_dot*DH/(4*np.pi*E_lim))
    print(f'{lbl:12s}: x_min={xL:.1f} m')
```

Maple — analitičko rešenje i plot E(x)

```
restart: Fr:=0.25: m_dot:=6.7: DH:=46330:
E:=x->Fr*m_dot*DH/(4*Pi*x^2):
seq(printf('x=%3.0f m  E=%5.2f kW/m^2\n',xi,E(xi)),$xi=10,100,10):
plot(E(x),x=1..200,
  labels=['x [m]','E [kW/m^2]'],title='Pool fire E(x)');
```

Co-funded by the European Union

Solid Flame Model — precizniji od tačkastog izvora

- Plamen se modeluje kao GEOMETRIJSKO TELO (cilindar za pool fire, konus za jet fire)
- Fluks plamena:

$$E = \mathrm{SEP} \cdot F_{12} \cdot \tau_a \quad [\mathrm{kW/m^2}]$$

- SEP = Specific Emissive Power — površinska gustina emitovane energije [kW/m²]
- F_{12} = ugaoni faktor (view factor) — zavisi od geometrije; tabelarno ili računski
- τ_a = atmosferska propustljivost (0,6–1,0; smanjuje se sa H_2O u vazduhu)

Tipične SEP vrednosti

- LNG požar: SEP = 130–220 kW/m² | Kerozin: SEP = 30–60 kW/m²
- Benzol: SEP = 45 kW/m² | Benzin: SEP = 30 kW/m² | Metan: SEP = 150 kW/m²
- SEP varira sa visinom plamena — više od tla ima više čađi koja smanjuje SEP

Co-funded by the European Union

Ugaoni faktor — brza aproksimacija (x >> D)

$$F_{12} \approx \frac{D^2 \cdot H}{4\pi \cdot \left(x^2 + \frac{H^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Maple — F_{12} za cilindrični plamen: D=10m, H=20m, x=50m

```
restart: D:=10: H:=20: x:=50: tau_a:=0.85: SEP:=130:
F12:=D^2*H/(4*Pi*(x^2+H^2/4)^1.5):
E:=SEP*F12*tau_a:
printf('F12=%.4f  E=%.2f kW/m^2\n',F12,E);
# Senzitivnost: E u funkciji x
Ef:=x->SEP*D^2*H/(4*Pi*(x^2+H^2/4)^1.5)*tau_a:
plot(Ef(x),x=5..200,title='Solid Flame E(x)');
```

Python — SEP upoređenje i kriva E(x) po Solid Flame modelu

```
import numpy as np
SEP_v={'benzin':30,'LNG':175,'kerozin':45,'propan':110}
D,H,tau_a=10,20,0.85
for g,SEP in SEP_v.items():
    xv=np.linspace(5,150,500)
    F12=D**2*H/(4*np.pi*(xv**2+H**2/4)**1.5)
    E50=SEP*F12[xv>=50][0]*tau_a
    print(f'{g:8s}: E(50m)={E50:.2f} kW/m^2')
```

Co-funded by the European Union

Jet Fire — osnovna jednačina dužine plamena

- Korelacija po Heseldenu:

$$L_f = 17{,}4 \cdot \left(\frac{\dot{m}}{\rho_{\text{stoich}}}\right)^{0{,}447} \text{ [m]}$$

- ρ_{stoich} = gustina stehiometrijske smeše gasa i vazduha $[\text{kg/m}^3]$
- Primer: $\dot{m} = 0{,}5$ kg/s metana; $\rho_{\text{stoich}} = 1{,}1$ kg/m^3:

$$L_f = 17{,}4 \cdot \left(\frac{0{,}5}{1{,}1}\right)^{0{,}447} = 12{,}1 \text{ m}$$

- API RP 520, konzervativnija procena:

$$L_f = 5{,}02 \cdot \dot{m}^{0{,}478} \text{ [m]}$$

BLEVE — ognjena lopta (Fireball) — Roberts (1981)

- Prečnik ognjene lopte:

$$D = 6{,}48 \cdot M_f^{0{,}325} \text{ [m]}$$

- Trajanje:

$$t = 0{,}852 \cdot M_f^{0{,}26} \text{ [s]}$$

- Visina centra: Hc ≈ 0,75·D | Emitovana energija: Q_r^{aD} = Fr × Mf × ΔHd

Co-funded by the European Union

Python — BLEVE za 10 t propana + upoređenje jet fire korelacija

```
Mf=10000; DH=46330; Fr=0.30
D=6.48*Mf**0.325; t=0.852*Mf**0.26
Q_rad=Fr*Mf*DH
print(f'D={D:.0f}m  t={t:.1f}s  Qrad={Q_rad/1e6:.1f} GJ')
for mdot in [0.1,0.5,1.0,5.0]:
    Lh=17.4*(mdot/1.1)**0.447; La=5.02*mdot**0.478
    print(f'm_dot={mdot}kg/s: Heselden={Lh:.1f}m  API={La:.1f}m')
```

Maple — BLEVE parametri kao funkcija mase goriva

```
restart:
D:=M->6.48*M^0.325: t:=M->0.852*M^0.26: Q:=M->0.30*M*46330:
for M in [1000,5000,10000,50000] do
  printf('M=%6d kg: D=%5.0fm  t=%4.1fs  Q=%5.1fGJ\n',
    M,D(M),t(M),Q(M)/1e6) od:
```

L5-4: Probit funkcija za termalne efekte — povrede i smrtnost

Co-funded by the European Union

Šta je probit?

- Statistička transformacija verovatnoće — Pr = 5 odgovara 50% smrtnosti
- Konverzija Pr u procenat smrtnosti:

$$P = 50 \cdot \left[1 + \mathrm{erf}\left(\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}}\right)\right]$$

Probit za termalne opekotine — Eisenberg (1975)

$$Pr = -14{,}9 + 2{,}56 \cdot \ln\left(t \cdot I^{4/3}\right)$$

- $t \cdot I^{4/3}$ = termalna doza [$W^{4/3}/(m^{8/3} \cdot s)$]

Tabela osetljivosti prema termalnoj dozi

- 1% smrtnosti: $t \times I^{4/3} = 1{,}8 \times 10^5$ $W^{4/3}/m^{8/3} \cdot s$
- 50% smrtnosti: $t \times I^{4/3} = 6{,}2 \times 10^5$ $W^{4/3}/m^{8/3} \cdot s$
- 99% smrtnosti: $t \times I^{4/3} = 2{,}1 \times 10^6$ $W^{4/3}/m^{8/3} \cdot s$

L5-4: Probit funkcija za termalne efekte — povrede i smrtnost

Co-funded by the European Union

EU SEVESO — granične vrednosti intenziteta zračenja

- 1 kW/m²: bezbedno za neograničenu izloženost (javnost)
- 4 kW/m²: moguće opekotine 1. stepena, kratki boravak uz zaštitu
- 12,5 kW/m²: 1% smrtnosti — granica za primarnu zonu zaštite
- 25 kW/m²: 100% smrtnosti, taljenje aluminijuma, paljenje drveta

Python — probit proračun za više scenarija (E, t)

```
from scipy.special import erf; import numpy as np
def Pr(I,t): return -14.9+2.56*np.log(t*I**(4/3))
def P(Pr_val): return 50*(1+erf((Pr_val-5)/2**0.5))
for t in [10,30,60]:
    for E in [4000,8000,12500,25000]:
        print(f't={t:2d}s E={E/1000:5.1f}kW: P={P(Pr(E,t)):5.1f}%')
```

L5-4: Probit funkcija za termalne efekte — povrede i smrtnost

Co-funded by the European Union

Maple — simbolički probit i plot krive smrtnosti

```
restart:
Pr:=(I,t)->-14.9+2.56*ln(t*I^(4/3)):
P:=p->50*(1+erf((p-5)/sqrt(2))):
plot(P(Pr(I,30)),I=1000..25000,
  labels=['I [W/m^2]','Smrtnost [%]'],title='Probit kriva, t=30s');
```

Co-funded by the European Union

Pristup proračunu bezbednih rastojanja

- Cilj: naći rastojanje x na kome je E(x) ispod zadatog praga (1, 4, 12,5 kW/m²)
- Model tačkastog izvora:

$$E(x) = \frac{Q_{\text{rad}}}{4\pi x^2}$$

$$x = \sqrt{\frac{Q_{\text{rad}}}{4\pi \cdot E_{\text{lim}}}}\ [\text{m}]$$

Primer — ručni proračun (pool fire benzina, bazen 20 × 20 m)

- m″ = 0,055 kg/(m²·s) | A = 400 m² → ṁ = 22 kg/s
- Q_{tot} = 22 × 44 400 = 976 800 kW | Fr = 0,25 → Q_r^{aD} = 244 200 kW
- x(1 kW/m²) = √(244 200/4π·1) = 139 m
- x(4 kW/m²) = √(244 200/4π·4) = 70 m
- x(12,5 kW/m²) = √(244 200/4π·12,5) = 39 m

Co-funded by the European Union

Maple — generalizovani proračun + senzitivnostna analiza

```
restart:
E_lim:=[1.0,4.0,12.5]:  # kW/m^2 (SEVESO)
Q_rad:=244200:  # kW
for i from 1 to 3 do
  x_b:=sqrt(Q_rad/(4*Pi*E_lim[i])):
  printf('E=%.1f kW/m^2 -> x=%.0f m\n',E_lim[i],x_b): od:
# Plot: x_bez vs Q_rad za sve SEVESO granice
plot([sqrt(Q/(4*Pi*el)) $ el=[1,4,12.5]],Q=5e4..5e5,
  legend=['1','4','12.5 kW/m^2'],title='Bezbedna rastojanja');
```

Python — potpuni proračun zona zaštite

```
import numpy as np, math
def zone(Q_rad, Fr=0.25):
    return {z:math.sqrt(Q_rad/(4*math.pi*E))
            for E,z in [(1,'I'),(4,'II'),(12.5,'III'),(25,'IV')]}
print('Bazen benzina 20x20m:')
[print(f'  Zona {z}: x_min={x:.0f} m') for z,x in zone(244200).items()]
```

Co-funded by the European Union

Texas City (SAD), 23. mart 2005.

- BP-ova rafinerija nafte — 15 poginulih, 180 povređenih, šteta > 1,5 mlrd USD
- Događaj: prepunjavanje ISOM tornja → prekoracenje nivoa → tečnost u kolonu za otplinjavanje
- Formiranje zapaljivog oblaka (VCE) oko preopterećene kolone za otplinjavanje
- Paljenje: motor prikolice na parkingu — klijent koji nije smeo biti tamo!
- Pouke: neispravan nivo-instrument, ignorisanje alarma, loše procedure, loša bezbednosna kultura

Buncefield (Velika Britanija), 11. decembar 2005.

- Rafinerija goriva — 23 povređene, nijedna smrtna žrtva, šteta > 1 mlrd GBP
- Događaj: prekoracenje nivoa u tanku T912 (benzin) → prelivanje → oblak pare
- Formiranje izuzetno gustog oblaka — vidljiv 50 km daleko!
- Eksplozija oblaka: nadpritisak 2,6 bar na 250 m (neuočljivo velik VCE efekat)

L5-4: Primeri nesreća — Texas City 2005 i Buncefield 2005

Co-funded by the European Union

Zajednički uzroci oba događaja

- Okvareni instrumenti za nivo nisu servisrani na vreme
- Operateri nisu reagovali na alarme — problem pretrpanosti alarmima (alarm flooding)
- Postupci za vanredne situacije bili neadekvatni ili se nisu primenjivali
- Swiss Cheese model — više slojeva odbrane istovremeno zakazalo

Python — analiza verovatnoće incidenata (Swiss Cheese)

```
barriers=[('alarm_nivo',0.15),('auto_zatv',0.02),('oper_proc',0.20),('zon.',0.25)]
P_top=1.0
for b,pfd in barriers:
    P_top*=pfd
    print(f'{b:12s}: PFD={pfd:.2f}  P_top(kumulat.)={P_top:.4e}')
print(f'Ukupna P(vrh.dogadjaj) = {P_top:.2e}')
```

Maple — proračun posledica i zona učednosti

```
restart:
# SEVESO zona za propan VCE nadpritisak
Q_rad:=244200: Fr:=0.25:
for E_lim in [1,4,12.5,25] do
  printf('E=%.1f kW/m^2 -> x=%.0f m\n',E_lim,
    sqrt(Fr*Q_rad/(4*Pi*E_lim))) od:
```

Co-funded by the European Union

Šta je Bow-Tie analiza?

- Dijagram koji prikazuje: pretnje → barijere → vrhunski događaj → barijere → posledice
- Leva strana: uzroci i barijere koje SPREČAVAJU događaj (preventivne mere)
- Desna strana: posledice i barijere koje UMANJUJU štetne efekte (zaštitne mere)

Bow-Tie za Texas City ISOM incident

- Pretnje (levo): Prekomerno punjenje, kvar instrumenta, greška operatera, kvar linije povratka
- Preventivne barijere: Visoki alarm nivoa, automatsko zatvaranje, operaterska procedura
- Vrhunski događaj: Gubitak primarne kontrole zapaljivog materijala
- Zaštitne barijere: Sistem za aktivno gašenje, evakuacija zone, hitne službe
- Posledice (desno): VCE, blic-požar, požar bazena, otrovni oblak

Gde su zakazale barijere? (Swiss Cheese analiza)

- Alarm za visoki nivo: neispravan instrument → barijera 'probita' (rupa u siru)
- Operaterska procedura: nije primenjena (loša bezbednosna kultura → rupa)
- Zoniranje: prikolice pored postrojenja — treća rupa
- Sve tri rupe podudarile se → katastrofa

Co-funded by the European Union

Python — analiza pouzdanosti barijera Bow-Tie

```
bars={'alarm':(0.15,'OTKAZ'),'auto_zatv':(0.02,'OK'),
      'oper_proc':(0.20,'OTKAZ'),'gasenje':(0.05,'OK')}
P_top=1.0
for nm,(pfd,st) in bars.items():
    P_top*=pfd
    print(f'{nm:12s}: PFD={pfd}  {st}  Pkum={P_top:.2e}')
print(f'\nP(vrh.dog.) = {P_top:.4f}')
```

Maple — verovatnoća vrhovnog događaja i osetljivostna analiza

```
restart:
p_alarm:=0.15: p_proc:=0.20: p_zon:=0.25:
P_top:=p_alarm*p_proc*p_zon:
printf('P(top event)=%.4f\n',P_top);
# Kriva osetljivosti: P_top vs PFD alarma
plot(pa*0.20*0.25,pa=0..1,
  labels=['PFD alarma','P(top)'],title='Osetljivost P_top');
```

Co-funded by the European Union

L5: Opasnosti i posledice u industriji

L5-5 Eksplozivne opasnosti i modelovanje eksplozija

Dr Milan Protić

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L5-5: Deflagracija i detonacija — ključne razlike

Co-funded by the European Union

Deflagracija

- Subzvučno širenje plamena kroz gorivu-vazdušnu mešavinu — fronta od 1 do 300 m/s
- Mehanizam: toplota se prenosi difuzijom iz plamena na neizgorelu smešu
- Pritisak: 5–10 bar za stoihiometrijsku smešu u zatvorenom prostoru (max. ≈8 bar za CH_4)

Detonacija

- Supersonicno širenje — Mach 1,5–3,0 — fronta ide uz udarni talas (shock wave)
- Mehanizam: udarni talas adijabatski komprimuje smešu do AIT → trenutno paljenje
- Chapman-Jouguet (CJ) pritisak: 15–20 bar za ugljovodonike (3× veći od deflagracije)
- Refleksija detonacije na zatvorenom kraju cevi: do 40 bar — razara instalacije!

Prelaz deflagracija → detonacija (DDT)

- DDT nastaje pri: visokoj turbulenciji, zagušenju u cevima, reaktivnim gorivima (C_2H_2, H_2)
- Vodonik (H_2): DDT nastupa mnogo lakše nego za ugljovodonike — posebno opasan!

L5-5: Deflagracija i detonacija — ključne razlike

Co-funded by the European Union

Karakteristike udarnog talasa — skalirano rastojanje

$$Z = \frac{x}{W^{1/3}} \quad [\mathrm{m/kg^3}]$$

- Pozitivna faza: nadpritisak ΔPs i pozitivni impuls Is — najvažniji parametri oštećenja
- Negativna faza (refrakcija): pritisak pada ispod atmosferskog — usisavanje

Python — CJ pritisak i DDT prag za različita goriva

```
gorivo = {'metan':8.0, 'propan':9.5, 'vodonik':15.0, 'acetilen':19.0}
# CJ pritisak aproksimacija (stoichiometricna smesa u vazduhu)
for g, p_cj in gorivo.items():
    p_defl = p_cj / 3
    print(f'{g:10s}: P_CJ={p_cj:.1f} bar  P_defl~{p_defl:.1f} bar')
```

Maple — simbolički Chapman-Jouguet proračun

```
restart: gamma:=1.3: p0:=1: M_CJ:=sqrt((gamma^2-1)/2+gamma):
p_CJ:=p0*(1+2*gamma*(M_CJ^2-1)/(gamma+1)):
printf('M_CJ=%.3f  P_CJ=%.2f bar\n',evalf(M_CJ),evalf(p_CJ));
```

L5-5: Eksplozija oblaka pare (VCE) — scenariji i energija

Co-funded by the European Union

Šta je VCE (Vapor Cloud Explosion)?

- Veća količina zapaljivog gasa/pare ispusta se u atmosferu, meša sa vazduhom i pali se
- Rezultat: deflagracioni ili detonacioni udarni talas u zavisnosti od geometrije i reaktivnosti
- Neophodni uslovi: više od ~1 tone izgorelog goriva, zagrađena geometrija, reaktivan gas

Inicijalna energija VCE

$$E_{\mathrm{VCE}} = \eta \cdot m_f \cdot \Delta H_d \quad [\mathrm{kJ}]$$

- η = faktor efektivnosti eksplozije (0,01–0,15 za VCE; 1,0 za TNT referentno)
- m_f = masa goriva u zapaljivom oblaku (ne celokupna ispustena masa!)

Kategorije reaktivnosti goriva

- Visoka reaktivnost: C_2H_2, H_2, etilen-oksid — DDT moguć u gustim oblacima
- Srednja reaktivnost: C_3H_8, butan (C_4H_{10}), LPG — deflagracija pri niskim zagušenjima
- Niska reaktivnost: metan (CH_4), etan (C_2H_6) — VCE uglavnom samo uz jako konfiniranje

L5-5: Eksplozija oblaka pare (VCE) — scenariji i energija

Co-funded by the European Union

Poznati VCE događaji

- Flixborough 1974 (UK): C_6H_{12} VCE, 28 poginulih — osnova za moderne VCE modele
- Buncefield 2005 (UK): Benzinska VCE, neočekivano visok nadpritisak (2,6 bar na 250 m)

Python — VCE energija i procena zona za različita goriva

```
goriva={'propan':46330,'metan':50050,'vodonik':120000,'cikloheksan':434
  50}
m_f=500; eta=0.05
for g,dH in goriva.items():
    E=eta*m_f*dH; W=E/4520
    print(f"{g:12s}: E={E/1e6:.2f} GJ  W_TNT={W:.0f} kg")
```

Maple — energija VCE kao funkcija mase i η

```
restart: dH_prop:=46330: m_f:=500:
E_VCE:=(eta,m)->eta*m*dH_prop:
for eta in [0.01,0.03,0.05,0.10] do
  printf('η=%.2f: E=%.2f GJ\n',eta,E_VCE(eta,m_f)/1e6): od:
```

L5-5: TNT ekvivalentna metoda — teorija i ručni proračun

Co-funded by the European Union

Osnova TNT ekvivalentne metode

- Eksplozija VCE se izjednačava sa detonacijom ekvivalentne mase TNT-a
- TNT referentna vrednost: ΔHd(TNT) = 4520 kJ/kg (ili 4680 kJ/kg po nekim izvorima)

$$W_{\mathrm{TNT}} = \frac{\alpha \cdot m_f \cdot \Delta H_f}{\Delta H_{\mathrm{TNT}}} \quad [\mathrm{kg}]$$

- α = faktor efikasnosti eksplozije (0,01–0,10 za VCE; konzervativno 0,03–0,05)

Skalirano rastojanje i nadpritisak

$$Z = \frac{x}{{W_{\mathrm{TNT}}}^{1/3}} \quad [\mathrm{m/kg^3}]$$

- ΔPs = f(Z) — očitava se sa Kingery-Bulmash krivih ili tabela (SFPE Handbook)

L5-5: TNT ekvivalentna metoda — teorija i ručni proračun

Co-funded by the European Union

Ručni proračun — VCE 500 kg propana (C_3H_8), α=0,03

- W_{TNT} = 0,03 × 500 × 46330 / 4520 = 153,8 kg TNT
- Na x=100m: Z = 100 / $153,8^{1/3}$ = 100 / 5,36 = 18,7 m/kg³
- Z=18,7: ΔPs ≈ 0,022 bar (lomljenje stakla, evakuacija populacije)
- Z=9,3: ΔPs ≈ 0,07 bar (lako oštećenje opeke, staklo se lomi)
- Ograničenje TNT metode: TNT je detonacija, VCE je deflagracija — metoda je konzervativna

Python — TNT ekvivalent + ΔPs za više rastojanja

```
alpha=0.03; m_f=500; dH_f=46330; dH_TNT=4520
W=alpha*m_f*dH_f/dH_TNT
for x in [30,50,100,150,200]:
    Z=x/W**(1/3)
    Ps=808*(1+(Z/4.5)**2)**(-0.5)+1.55*(1+(Z/0.38)**2)**(-0.5)
    print(f'x={x}m Z={Z:.2f} ΔPs={Ps/100:.3f} bar')
```

Maple — Kingery-Bulmash polinom i grafikoni

```
restart: alpha:=0.03: m_f:=500: dH:=46330: dH_T:=4520:
W:=alpha*m_f*dH/dH_T: # 153.8 kg TNT
# KB polinom za slobodni vazdusni prasak
KB:=Z->exp(2.611-1.069*ln(Z)-0.211*ln(Z)^2)/1e3:
for x in [30,50,100,150,200] do Z:=x/W^(1/3):
  printf('x=%dm Z=%.2f Ps=%.3f bar\n',x,Z,KB(Z)): od:
```

L5-5: TNT metoda — MAPLE implementacija

Co-funded by the European Union

MAPLE — TNT proračun sa Kingery-Bulmash tabelama

```
restart:
alpha:=0.03: m_f:=500: DTV:=46330: DTV_TNT:=4520:
W_TNT:=alpha*m_f*DTV/DTV_TNT:
printf('W_TNT = %.1f kg\n', W_TNT):
KB:=Z->exp(2.611-1.069*ln(Z)-0.211*ln(Z)^2)/1e3:
for x in [30,50,75,100,150,200] do
  Z:=x/W_TNT^(1/3): printf('x=%dm Z=%.2f Ps=%.3f bar\n',x,Z,KB(Z)):
od:
```

MAPLE — plot ΔPs(x) sa SEVESO granicama

```
Ps_x:=x->KB(x/W_TNT^(1/3)):
plot([Ps_x(x),0.02,0.05,0.10],x=20..250,
  color=[blue,red,orange,green],
  labels=['x [m]','Ps [bar]'],title='TNT VCE Ps(x)');
```

L5-5: TNT metoda —Python implementacija

Co-funded by the European Union

Python — TNT višenamenska funkcija + vizualizacija

```
import numpy as np
def tnt_ps(W_TNT, x_arr):
    Z=x_arr/W_TNT**(1/3)
    return 808*(1+(Z/4.5)**2)**(-0.5)+1.55*(1+(Z/0.38)**2)**(-0.5)
goriva={'propan':(46330,0.03),'metan':(50050,0.02),'H2':(120000,0.01)}
x=np.linspace(20,300,500)
for g,(dH,al) in goriva.items():
    W=al*500*dH/4520; Ps=tnt_ps(W,x)/100
    print(f'{g:8s} W_TNT={W:.0f}kg Ps(50m)={Ps[x>=50][0]:.3f} bar')
```

Python — Poredenje više scenarija (alfa, masa)

```
alphe=[0.01,0.03,0.05,0.10]; mase=[100,500,1000]
for m in mase:
    for al in alphe:
        W=al*m*46330/4520
        Z50=50/W**(1/3)
        Ps50=(808/(1+(Z50/4.5)**2)**0.5)/100
        print(f'm={m:4d}kg al={al:.2f}: Ps(50m)={Ps50:.3f}bar')
```

L5-5: Baker-Strehlow-Tang (BST) metoda

Co-funded by the European Union

Zašto BST metoda?

- TNT ekvivalent: VCE je deflagracija, ne detonacija — TNT prece njuje bliske efekte
- BST: fizički realnije — uzima u obzir Mahov broj plamena i stepen konfiniranja

Osnova BST metode

- 1. Biramo klasu reaktivnosti: Niska (L), Srednja (M), Visoka (H)
- 2. Biramo stepen zagrađenosti: 1D (cevi), 2D (prostor između ploča), 3D (slobodan)
- 3. Iz tabele: Mahov broj plamena M_f

$$R' = \frac{x}{E_{\mathrm{VCE}}{}^{1/3}} \quad [\mathrm{bezdim.}]$$

$$\Delta P_s = P_s{}' \cdot p_0$$

L5-5: Baker-Strehlow-Tang (BST) metoda

Co-funded by the European Union

Tabela Mahovih brojeva (odabrani)

- C_3H_8/butan — 2D — srednja gustina prepreka: $M_f = 0,70$
- C_3H_8/butan — 3D — retke prepreke: $M_f = 0,25$
- Metan (CH_4) — 2D — srednja gustina prepreka: $M_f = 0,35$
- Vodonik (H_2) — 3D — supersonicno!: $M_f = 5,20$

Primer: VCE 500 kg C_3H_8 u industr. postrojenju, 2D geometrija

- $E_{VCE} = 0,03 \times 500 \times 46330 = 694\,950$ kJ | $M_f = 0,70$ (srednje zagušenje)
- Na x=50m: $R' = 50 / (694950)^{1/3} = 50 / 88,6 = 0,564$
- BST nomogram za M_f=0,70: $Ps' \approx 0,4 \rightarrow \Delta P_s = 0,4 \times 0,1013 = 0,04$ bar

Python — BST lookup za različite Mf vrednosti

```
# Pierorazio 2005 korelacija za BST
def bst_ps(Mf, R):
    import numpy as np
    lPs=3.18-1.40*np.log10(R)+0.091*np.log10(R)**2
    return 10**lPs*0.1013
for Mf in [0.25,0.35,0.70,1.00,5.20]:
    print(f'Mf={Mf:.2f}: Ps(50m)={bst_ps(Mf,0.564):.3f} bar')
```

L5-5: BST metoda — Python + poređenje TNT/BST

Co-funded by the European Union

Python — BST aproksimacija (Pierorazio 2005 korelacija)

```
import numpy as np
def bst_nadpritisak(Mf, R_prim):
    a1,a2,a3=3.1837,-1.4017,0.091
    lPs=a1+a2*np.log10(R_prim)+a3*np.log10(R_prim)**2
    return 10**lPs*0.1013  # bar
E_VCE=694950e3; Mf=0.70  # propan, 2D
for x in [30,50,75,100,150,200]:
    Rp=x/E_VCE**(1/3)
    print(f'x={x}m Ps_BST={bst_nadpritisak(Mf,Rp):.3f} bar')
```

Python — upoređenje TNT vs. BST na istoj masi C_3H_8

```
def tnt_ps(W,x): Z=x/W**(1/3)
    return(808/(1+(Z/4.5)**2)**0.5)/100
W_TNT=153.8; E_VCE=694950e3; Mf=0.70
for x in [30,50,100,200]:
    Rp=x/E_VCE**(1/3)
    Pb=bst_nadpritisak(Mf,Rp)
    Pt=tnt_ps(W_TNT,x)
    print(f'x={x}m BST={Pb:.3f} TNT={Pt:.3f} ratio={Pt/Pb:.2f}')
```

L5-5: BST metoda — Python + poređenje TNT/BST

Co-funded by the European Union

Maple — BST aproksimacija + plot

```
restart: E_VCE:=694950e3: Mf:=0.70:
bst:=R->10^(3.1837-1.4017*log10(R)+0.091*log10(R)^2)*0.1013:
Rprim:=x->x/E_VCE^(1/3):
plot(bst(Rprim(x)),x=20..300,
  labels=['x [m]','Ps [bar]'],title='BST propan 2D');
```

Preporučena procedura za SEVESO procenu rizika

- Na maloj udaljenosti: TNT prece njuje nadpritisak — BST je fizički realnije i manji
- Na velikoj udaljenosti: BST može dati veći P_s od TNT za visoke M_f (VCE traje duže)
- Preporuča se: koristiti obe metode, uzeti konzervativniji rezultat

Co-funded by the European Union

Eksplozija u zatvorenoj posudi

- Zapaljiva smeša unutar reaktora, filtera, suša ili prašine unutar silosa
- Maksimalni pritisak eksplozije (stoihiometrijski CH_4-vazduh):

$$P_{\max} = P_0 \cdot \frac{T_f}{T_0} \cdot \frac{n_{\text{prod}}}{n_{\text{reakt}}}$$

- Za stoihiometrijski CH_4-vazduh: P_{max} ≈8 bar — dimenzionisanje posude!

Parametar Kst (prašina) i Kg (gasovi)

$$K_g = \left(\frac{\mathrm{dP}}{\mathrm{dt}}\right)_{\max} \cdot V^{1/3} \quad [\mathrm{bar} \cdot \mathrm{m/s}]$$

- $K_g(CH_4)$ ≈ 55 bar·m/s | $K_g(C_3H_8)$ ≈ 100 bar·m/s | $K_g(H_2)$ ≈ 550 bar·m/s

Projektovanje zaštitnih elemenata (NFPA 68)

$$A_v = A_s \cdot K_{\text{st}} \cdot {P_{\text{red}}}^{-0{,}569} \quad [\mathrm{m}^2]$$

- P_{red} = projektovani maksimalni pritisak koji sme da se razvije u zaštićenoj posudi

Co-funded by the European Union

Python — dimenzionisanje ventilacione površine za različite Kst/Pred

```
Kst_list={'metan':55,'propan':100,'vodonik':550,'prasina':200}
Pred_list=[0.2,0.5,1.0]  # bar
As=50.0  # m^2
for g,Kst in Kst_list.items():
    for Pred in Pred_list:
        Av=As*Kst*Pred**(-0.569)
        print(f'{g:8s} Pred={Pred:.1f}bar: Av={Av:.1f} m^2')
```

Maple — analiza osetljivosti Av na Kst i Pred

```
restart: As:=50: Av:=(Kst,Pred)->As*Kst*Pred^(-0.569):
seq(seq(printf('Kst=%d Pred=%.1f: Av=%.1f m^2\n',
  K,P,Av(K,P)),P=[0.2,0.5,1.0]),K=[55,100,550]):
```

Co-funded by the European Union

Pragovi oštećenja (bočni nadpritisak)

- 0,02 bar (2 kPa): Lomljenje stakla, evakuacija zone
- 0,05 bar (5 kPa): Šteta po unutrašnjost nepotpornih zgrada
- 0,07 bar (7 kPa): Delimicno rušenje zidova od opeke bez armature
- 0,10 bar (10 kPa): Rušenje zidova od opeke, oštećenje strehe
- 0,17 bar (17 kPa): Teška oštećenja metalnih okvira i industrijskih objekata
- 0,30 bar (30 kPa): Oštećenje armiranog betona, mašinska oštećenja
- 0,50 bar (50 kPa): Teška oštećenja čeličnih ramova
- 1,00 bar (100 kPa): Gotovo potpuno rušenje većine građevinskih objekata

L5-5: Oštećenja od eksplozija — pragovi i primeri

Co-funded by the European Union

Python — karta oštećenja (izobare zone) oko izvora

```
import math
W=153.8  # kg TNT (500 kg propana, alpha=0.03)
pragovi={'staklo':0.02,'opeka':0.07,'beton':0.30,'celicni ram':0.50}
for opis,Ps_lim in pragovi.items():
    # Inverzna Kingery-Bulmash za Z od Ps
    # Iterativno: x=Z*W^(1/3)
    Z=5.0  # pocetna vrednost
    for _ in range(50):
        Ps=(808/(1+(Z/4.5)**2)**0.5)/100
        Z+=0.1 if Ps>Ps_lim else -0.05
    print(f'{opis:15s}: x_min={Z*W**(1/3):.0f} m')
```

Maple — plot Ps(x) + SEVESO granicne vrednosti

```
restart: W:=153.8:
Ps:=x->808*(1+(x/W^(1/3)/4.5)^2)^(-0.5)/100:
plot([Ps(x),0.02,0.05,0.10,0.30],x=10..300,
  color=[blue,red,orange,green,purple],
  labels=['x [m]','Ps [bar]'],
  legend=['Ps(x)','staklo','opeka','beton','SEVESO'],
  title='Karta ostecenja TNT VCE');
```

L5-5: Flixborough 1974 — analiza VCE katastrofe

Co-funded by the European Union

Hronološki pregled događaja

- Napleston Chemicals (UK): produkcija cikloheksanola oksidacijom C_6H_{12}
- 01. jun 1974: Peti reaktor (R5) otkriven — puknuca na zavarenom spoju
- Privremena zamenska cev (28-inča, neodgovarajući materijal, bez inžinjerskih proračuna)
- 01. jun 1974 — 16:53: Zamenska cev puca — ispusta se ≈30–50 tona C_6H_{12}
- 16:53:45: Paljenje oblaka — masivna VCE | 28 poginulih, 36 povređenih
- Skoro celo postrojenje uništeno, prozori na zgradama 3 km daleko

Koreni uzroci (Root Causes)

- Izmena postrojenja (MOC) bez adekvatne inžinjerske revizije i odobrenja
- Nema procedura za upravljanje promenama — inženjeri pod pritiskom roka
- Nema procena rizika za privremene instalacije

Pouke i sistemske izmene koje su usledile

- Osnova UK CIMAH propisa (SEVESO I implementacija u UK) — obavezni izveštaji
- Razvoj QRA (Quantitative Risk Assessment) kao standardnog alata
- Uvedene obavezne Studije hazarda i operabilnosti (HAZOP)

L5-5: Flixborough 1974 — analiza VCE katastrofe

Co-funded by the European Union

Python — back-kalkulacija VCE energije iz posmatraēnih oštećenja

```
import math
# Posmatrano: lomljenje stakla na 3000m -> Ps ~ 0.02 bar
Ps_obs=0.02; x_obs=3000
# Inverz KB: naci W_TNT
def ps_tnt(W,x): Z=x/W**(1/3)
    return(808/(1+(Z/4.5)**2)**0.5)/100
W=1.0
while ps_tnt(W,x_obs)<Ps_obs: W*=1.05
print(f'Procenjeni W_TNT={W:.0f} kg  =>  m_f~{W*4520/46330/0.03:.0f} kg')
```

Maple — analiza stabla kvarova (Fault Tree) — Flixborough

```
restart:
# Verovatnoce baznih dogadjaja
p_MOC:=0.30: p_mat:=0.20: p_proc:=0.25: p_zon:=0.40:
# Sve 4 barijere zakazale istovremeno
P_top:=p_MOC*p_mat*p_proc*p_zon:
printf('P(top event) = %.4f\n', P_top);
```

Co-funded by the European Union

L5: Opasnosti i posledice u industriji

L5-6 Eksplozije prašine i detonacije

Dr Milan Protić

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L5-6: Pentagon eksplozije prašine — pet neophodnih uslova

Co-funded by the European Union

Svakom eksploziji prašine prethodi pet istovremenih uslova — Pentagon prašine

Uslov 1: Zapaljiva prašina
- Organska prašina: brašno, šećer, drvo, ugalj, plastične mase, žito — gorivi materijali
- Metalna prašina: Al, Mg, Ti, Fe — posebno reaktivni, eksplozivniji od organskih!

Uslov 2: Prašina raspršena u vazduhu — formiran oblak prašine
- Samo lebdeća frakcija < 500 µm gradi eksplozivni oblak
- Talog prašine na površinama: opasnost od sekundarnih eksplozija

Uslov 3: Koncentracija prašine u eksplozivnom opsegu
- Ispod MEC (minimalne eksplozivne koncentracije): previše siromašna smeša — ne eksplodira
- Tipični MEC: skrobna prašina = 40 g/m³ | aluminijum = 30 g/m³ | ugalj = 60 g/m³

Uslov 4: Izvor paljenja
- Iskra (mehanička, električna), vruća površina, elektrostatičko pražnjenje, otvoreni plamen

Uslov 5: Konfiniranje (ograničen prostor)
- Omogućava rast pritiska — bez konfiniranja nema razornog nadpritiska, samo flash fire
- KLJUČNA MERA PREVENCIJE: Ukloniti BILO KOJI od pet uslova!

Co-funded by the European Union

Indeks deflagracije prašine — K_{st}

$$K_{\mathrm{st}} = \left(^{dP}/_{dt}\right)_{\max} \times V^{1/3} \ [\mathrm{bar} \cdot \mathrm{m/s}]$$

merenje u standardnoj 20 L ili 1 m³ posudi

- Normalizuje brzinu porasta pritiska u odnosu na zapreminu posude

Klasifikacija po Kst:

- St 0: Kst = 0 — prašina NIJE eksplozivna (npr. kalcijum karbonat, pesak)
- St 1: Kst = 1–200 — slaba eksplozija (brašno, šećer, drvena piljevina)
- St 2: Kst = 200–300 — jaka eksplozija (lignit, ugalj, polietilen)
- St 3: Kst > 300 — izuzetno jaka (aluminijum, magnezijum, toner za štampače)

Maksimalni pritisak eksplozije (P_{max})

- Maksimalni pritisak koji se razvija u zatvorenoj posudi pri eksploziji stehiometrijskog oblaka
- Tipične vrednosti: P_{max} = 7–10 bar za organsku prašinu | 10–13 bar za metalne prašine

L5-6: Parametri eksplozije prašine — Kst, MEC, MIE

Co-funded by the European Union

Minimalna eksplozivna koncentracija (MEC)

- Najniža koncentracija prašine u vazduhu ispod koje eksplozija ne nastaje
- Pšenično brašno: MEC ≈ 40 g/m³ | Aluminijum: MEC ≈ 30 g/m³ | Lignit: MEC ≈ 60 g/m³

Minimalna energija paljenja (MEP — MIE)

- Krupne čestice (>500 µm): MEP > 100 mJ — teže za paliti
- Fine čestice (<63 µm): MEP < 10 mJ — elektrostatičko pražnjenje ih pali!

L5-6: EU ATEX direktiva za eksplozivne atmosfere prašine

Co-funded by the European Union

ATEX — dva ključna dokumenta EU

- Direktiva 1999/92/EC: minimalni zahtevi za zaštitu radnika u potencijalno eksplozivnim atmosferama
- Direktiva 2014/34/EU: zahtevi za opremu i zaštitne sisteme u eksplozivnim atmosferama

Klasifikacija opasnih zona za prašinu

- Zona 20: Eksplozivna atmosfera od oblaka prašine prisutna STALNO ili dugo u normalnom radu
- Zona 21: Oblak prašine može biti povremeno prisutan tokom normalnog rada
- Zona 22: Oblak prašine nije očekivan, ali može nastati pri kvarovima — kratko vreme

Analogija sa gasovitim atmosferama:

- Zona 20 odgovara Zoni 0 za gasove (stalna opasnost) — najstroži zahtevi za opremu
- Zona 21 odgovara Zoni 1 | Zona 22 odgovara Zoni 2

Kategorije opreme za zone prašine

- Zona 20: Kategorija 1D opreme (Ex tD A20 IP6X) — hermetički zapečaćeno kućište
- Zona 21: Kategorija 2D (Ex tD A21 IP5X) — prašinsko-zaštićeno kućište
- Zona 22: Kategorija 3D (Ex tD A22 IP4X) — zaprašenost sprečena ventilacijom

Temperatura zapaljenja sloja prašine

- T_{5mm} = temperatura paljenja 5 mm sloja prašine na vrućoj površini — često niža od MIT!
- Pravilo: $T_{površine}$ opreme ≤ (2/3) × T_{5mm} (faktor bezbednosti 1,5)

L5-6: Projektovanje zaštitnih sistema — ventilacioni otvori i supresorski sistemi

Co-funded by the European Union

Ventilacioni otvori (Explosion Vents) — NFPA 68 princip

- Eksplozija razvija pritisak unutar postrojenja — ventilacioni otvor se otvara i oslobađa pritisak pre nego što se dostigne Pred (projektovani pritisak)

$$A_v = {K_{\mathrm{st}}}^{0{,}569} \times (10 \cdot A_s)^{0{,}753} \times {P_{\mathrm{red}}}^{-0{,}569} \ [\mathrm{m}^2]$$ (uprošćena formula)

- A_v mora biti projektovana tako da $P < P_{red}$ ostane ispod čvrstoće posude

Sistemi za supresiju eksplozije

- Detektuju početak eksplozije (dP/dt) i injektuju hemijsko sredstvo za gašenje za < 20 ms
- Sredstva: natrijum bikarbonat, amonijev fosfat, halon alternativa
- Efikasni pri manjim K_{st} vrednostima (S_{t1}, nižem S_{t2}) — za S_{t3} (Al, Mg) teže se koriste

Eksploziona izolacija

- Brze zatvarajući ventili (chemical isolation), 'choke tube' — sprečavaju sekundarnu eksploziju
- Rotacioni ventili (rotary airlocks) na ulazu/izlazu silosa — meh. barijera

Sekundarne eksplozije — najopasniji scenario!

- Primarna eksplozija potresa talog prašine → lebdeći oblak → sekundarna eksplozija
- Sekundarna eksplozija često je razornija od primarne — talozi iz 10 godina!
- KLJUČNA PORUKA: Redovno i čisto održavanje — uklanjanje taloga prašine svake nedelje!

L5-6: MAPLE proračun parametara eksplozije prašine

Co-funded by the European Union

Zadatak: Projektovati ventilacioni otvor za silo za brašno

- Dato: K_{st} = 120 bar·m/s | P_{max} = 8,5 bar | P_{red} = 0,3 bar | V = 500 m³

$$A_s = 5 \times V^{2/3} = 315\ \text{m}^2$$ (unutrašnja površina silosa, $A_s = 5 \times V^{2/3} = 315$ m²)

Rešenje u MAPLE:

```
restart:
Kst := 120.0: Pred := 0.3: V := 500: As := 5 * V^(2/3):
# NFPA 68 formula za Kst <= 200:
Av := Kst^0.569 * (10*As)^0.753 * Pred^(-0.569):
printf('Površina venta: Av = %.2f m^2
', Av):
D_vent := sqrt(4*Av/Pi):
printf('Ekvivalentni prečnik venta: %.2f m
', D_vent):
```

Python ekvivalent:

```
import math
Kst=120; Pred=0.3; V=500
As = 5 * V**(2/3)
Av = Kst**0.569 * (10*As)**0.753 * Pred**(-0.569)
print(f'Av = {Av:.2f} m^2, D_ekv = {math.sqrt(4*Av/math.pi):.2f} m')
```

L5-6: Primeri nesreća sa eksplozijama prašine

Co-funded by the European Union

Imperial Sugar (SAD), 7. februar 2008.

- Sugar refinery, Georgia — eksplozija šećerne prašine, 14 poginulih, 36 povređenih
- Uzrok: gomilanje šećerne prašine ispod transportnih traka tokom decenija lošim održavanjem
- Inicijalna eksplozija mala → podigla talog → masivna sekundarna eksplozija kroz celu fabriku
- K_{st}(šećer) ≈ 100 bar·m/s — St 1 kategorija, ali sasvim dovoljna za katastrofu

West Pharmaceutical Services (SAD), 2003.

- Polietilen (PE) prašina akumulirana u ventilacionom sistemu — 6 poginulih
- K_{st}(PE) ≈ 200 bar·m/s (St 2!) — projektanti nisu znali da je PE prašina eksplozivna

Zablude o eksplozijama prašine

- Mislimo da je prašina 'samo prašina' — ne eksplodira | POGREŠNO: gotovo svaka organska prašina je eksplozivna
- Mislimo da su metali stabilni | POGREŠNO: Al, Mg, Ti, Fe prašine su OPASNIJE od ugljovodoničkih!
- Sekundarne eksplozije se mogu sprečiti dobrim domaćinstvovanjem | TAČNO: redovna čistoća je ključna!

Protokol analize hazarda prašine

- Korak 1: Testirati Kst i Pmax u akreditovanoj laboratoriji (ISO 6184)
- Korak 2: Klasifikovati radne zone (ATEX Zona 20/21/22)
- Korak 3: Projektovati ventilacione otvore, supresore i izolacione sisteme
- Korak 4: Implementirati program čistoće prostorija (< 0,8 mm nataložene prašine)

Co-funded by the European Union

Prelaz deflagracija → detonacija u cevovodu (DDT)

- Deflagracija u cevovodu ubrzava zbog turbulencije na preprekama (prirubnicama, kolenima)
- Ako brzina dostigne DDT brzinu (zavisi od goriva): formira se stabilna detonacija
- Run-up rastojanje: L_{DDT} = f(prečnik cevi, reaktivnost goriva, prepreke)

CJ (Chapman-Jouguet) pritisak za ugljovodonik-vazduh smeše

- P_{CJ} ≈ 15–20 bar za ugljovodonike u vazduhu (metan: 17 bar, propan: 18 bar, H_2: 14 bar)
- Reflektovani pritisak na zatvorenoj strani cevi: $P_r \approx 2{,}5 \times P_{CJ} \approx$ 37–50 bar!
- Ova vrednost lako razara standardne industrijske cevi (nominalni pritiski 10–40 bar)

Co-funded by the European Union

Mere zaštite od detonacije u cevovodima

- Detonacioni hvatači (DDT arresters): porozne pregrade koje gase detonacioni front
- Automatski izolovani ventili: reaguju na porast pritiska za < 20 ms
- Ograničenje pretnje: ne dozvoliti akumulaciju goriva u cevovodu (često ispiranje N_2)

Run-up rastojanje — Python/MAPLE proračun

$$L_{\mathrm{DDT}} = 43 \cdot \mathrm{D} \cdot \left(1 + {}^{28,6}/_{\chi\ -\ 1}\right) \quad \text{(metan u vazduhu)}$$

```
# Empirijska formula za DDT run-up (Knystautas 1984):
D = 0.1   # m (prečnik cevi)
chi = 7   # stepen kompresije (metan ~7)
L_DDT = 43 * D * (1 + 28.6 / (chi - 1))
print(f'Run-up do DDT: {L_DDT:.1f} m')
```

Co-funded by the European Union

L5: Opasnosti i posledice u industriji

L5-9 AVEVA Process Simulation i AVEVA XR — virtuelno postrojenje

Dr Milan Protić

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

L5-9: AVEVA Process Simulation i AVEVA XR — uvod u virtuelnu laboratoriju

Co-funded by the European Union

Šta je AVEVA Process Simulation?

- Industrijski standard za dinamičku simulaciju procesnih postrojenja (koriste Shell, BASF, BP, Total)
- Grafička/vizuelna reprezentacija realnih postrojenja sa simulacijom podležećih procesa u realnom vremenu
- Simulacija normalnog rada, startovanja, zaustavljanja i vanrednih situacija

AVEVA XR — Extended Reality

- Imerzivno 3D virtuelno okruženje — student ulazi i prolazi kroz kompletno procesno postrojenje
- Interakcija sa komponentama: ventili (otvaranje/zatvaranje), instrumenti (očitavanje/podešavanje)
- Bez fizičkog rizika — neograničeno ponavljanje opasnih scenarija u potpunoj bezbednosti

Zašto AVEVA XR u obrazovanju?

- Studenti mogu da prave greške bez posledica — jedini način za stvarno učenje složenijih procedura
- Razvija prostornu svest o rasporedu postrojenja — ključno za razumevanje puteva širenja hazarda
- Direktna veza između teorije iz L5-1 do L5-6 i realizovanih procesa na virtuelnom postrojenju
- Učenje od kuće u slučaju pandemije ili ograničenog pristupa postrojenjima

Postrojenja dostupna u AVEVA okruženju za ovaj kurs

- Rafinerija nafte (frakciona destilacija, hidrokraking, platforming)
- Petrohemijsko postrojenje (kreking etilena, polimerizacija)
- LNG terminal (utečnjavanje, skladištenje, regasifikacija)

L5-9: Scenariji bezbednosti u AVEVA XR — praktične vežbe

Co-funded by the European Union

Scenario 1: Curenje gasa pod pritiskom iz prirubnice

- Postrojenje: kompresorska stanica, cevovod visokog pritiska (P = 40 bar, metan)
- Događaj: simulirano curenje iz prirubnice 2 inch
- Zadatak studenta: identifikovati zonu zapaljivog oblaka, aktivirati ESD, obavestiti vatrogasce
- Veza sa teorijom: koristiti DGZ/GGZ i modele disperzije iz L5-3/L6 da proceni rizičnu zonu

Scenario 2: Hlađenje vode otkazuje u egzotermnom reaktoru

- Postrojenje: polimerizacioni reaktor (Tnor = 60°C, Pnor = 5 bar)
- Događaj: pumpa hlađenja staje, temperatura u reaktoru počinje da raste
- Zadatak: pratiti termičko bekstvo, aktivirati emergentno hlađenje, znati kada evakuisati
- Veza sa teorijom: adijabatska temperatura iz L5-1, termodinamika bekstva iz L5-2

Scenario 3: Nepravilno otvaranje ventila pri startovanju postrojenja

- Događaj: operater greškom otvori bypass ventil pre nego što se sistem stabilizovao
- Rezultat: masivni protok goriva na pogrešnom mestu — curenje → požarni rizik
- Zadatak: prepoznati grešku, hitno zatvoriti ventil, proceniti da li je potrebna evakuacija
- Veza sa teorijom: modeli brzine isticanja (Bernulijev model L5-2/L6)

L5-9: AVEVA XR — veza teorije i prakse

Co-funded by the European Union

Teorija iz kursa i primena u AVEVA XR

- L5-1 ATP i energija sagorevanja → videti izlazne temperature i energetsku bilansu reaktora
- L5-2 Bernulijev model → izračunati protok pri simuliranom ispuštanju i proveriti vrednost
- L5-3 DGZ/GGZ i granice zapaljivosti → AVEVA XR prikazuje koncentracioni gradijent pri curenju
- L5-4 Modeli radijacije → virtuelni pool fire: AVEVA prikazuje temperature u funkciji rastojanja
- L5-5 TNT/BST metode → AVEVA prikazuje blast zonu oko virtuelne eksplozije VCE

Procedure za hitne situacije

- ESOP (Emergency Shutdown Operating Procedure): sistemski redosled zatvaranja postrojenja
- Korak 1: Aktivirati ESD (Emergency Shutdown Device) — glavni ventil postrojenja
- Korak 2: Obavestiti kontrolnu sobu (SOC/OCC) i vatrogasce (112)
- Korak 3: Evakuisati zonu prema unapred određenim pravcima (ne nasuprot vetru!)
- Korak 4: Muster station — prebrojati sve radnike sa liste

Šta studenti unose o AVEVA:

- Postrojenje je mnogo veće i složenije nego što se može zamisliti iz crteža u udžbeniku
- Potrebno je vreme da se savlada snalaženje — prostorna svest se razvija postepeno
- Greške u virtuelnom okruženju su najvrednije iskustvo — u stvarnosti možda nemamo drugu šansu

L5-9: Digitalna transformacija procesne bezbednosti — pogled u budućnost

Co-funded by the European Union

Digitalni blizanac (Digital Twin)

- Virtuelni model postrojenja koji se napaja podacima u realnom vremenu sa DCS/SCADA sistema
- Omogućava predviđanje kvarova pre nego što se dogode (predictive maintenance)
- Testiranje 'što ako' scenarija bez zaustavljanja produkcije — osnova bezbednog poslovanja

IoT senzori za praćenje na radnom mestu (L10, predavač Viša Tasić)

- Arduino/Raspberry Pi senzori za CO, NO_2, VOC na postrojenju — niskobudžetni, ali efikasni
- Podaci se smeštaju u cloud platforme (InfluxDB, Grafana) — kontinualno praćenje
- Mašinsko učenje za detekciju anomalija (L8): modeli koji uče normalan režim i alarmiraju na devijacije

Budućnost SEVESO inspektorata

- EU planira digitalizovanje SEVESO izveštaja o bezbednosti — uniformni format podataka
- AI asistenti za analizu izveštaja i identifikaciju sistema koji zaostaju za najboljom praksom
- Interoperabilnost: MARS baza + digitalni blizanci + ML modeli = novi standardi bezbednosti

Zaključna poruka za L5-9

- Digitalne tehnologije nisu zamena za fundamentalno razumevanje hemije i fizike požara/eksplozija
- Bez L5-1 do L5-6, simulacija je igrica — sa njima, simulacija je profesionalni alat za zaštitu života

L5: Sumarni pregled ključnih kompetencija i EU zakonodavstvo

Co-funded by the European Union

Kompetencije stečene kroz L5 (20h)

- Primeniti termodinamičke i hidrodinamičke principe za kvantifikaciju veličine požarnih i eksplozivnih opasnosti
- Izračunati DGZ, GGZ, tačku paljenja; primeniti Le Chatelierovo pravilo za smeše gasova
- Odabrati odgovarajući model požara i izračunati toplotnu radijaciju na rastojanju (EU SEVESO)
- Primeniti TNT ekvivalent i Baker-Strehlow-Tang metodu za procenu VCE posledica
- Klasifikovati hazard eksplozije prašine korišćenjem Kst i projektovati mere prevencije/ublažavanja
- Interpretirati FTIR podatke o toksičnim produktima sagorevanja i izračunati kumulativnu toksičnu dozu
- Sprovoditi virtuelnu analizu bezbednosnih scenarija u AVEVA XR okruženju
- Primeniti Python i MAPLE za sve numeričke proračune i vizualizacije

Veza sa EU zakonodavstvom

- SEVESO III konsekventna analiza zahteva modele iz L5-4 i L5-5 — obavezne u izveštajima o bezbednosti
- ATEX zona klasifikacije zahteva DGZ/GGZ/OKK/MEP podatke iz L5-3 i L5-6
- EU OEL (radna granična izloženost) za toksične produkte sagorevanja direktno iz L5-7 laboratorije

Ključna literatura

- Crowl i Louvar: Chemical Process Safety — Fundamentals with Applications (3. izd.)
- Benintendi: Process Safety Calculations (Elsevier, 2021.)
- Mannan: Lees Loss Prevention in the Process Industries (4. izd.)
- CCPS: Process Safety for Engineers — An Introduction (2. izd., 2022.)