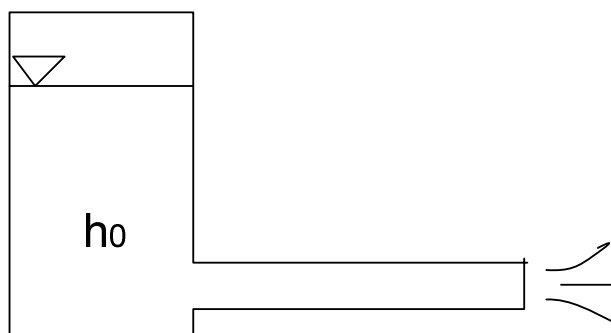


## PRORAČUN KRITIČNOG ISTICANJA DVOFAZNE MEŠAVINE

Do isticanja dvofazne mešavine dolazi pri otvaranju sigurnosnih ili rasteretnih ventila na cevovodima ili posudama pod pritiskom ispunjenim vrelom tečnošću ili dvofaznom mešavinom. Takođe, do isticanja dvofazne mešavine može doći ukoliko u sistemu pod pritiskom i ispunjenom vrelom tečnošću ili dvofaznom mešavinom dođe do narušavanja intergiteta zidova ili armature posuda pod pritiskom ili cevovoda (pojava naprslina ili loma). Za inženjerske proračune je pogodan postupak Moody-ja za određivanje kritičnog protoka, zato jer omogućava određivanje kritičnog protoka na osnovu stagnantnih uzvodnih parametara toka. Zasnovan je na pretpostavci o termičkoj ravnoteži između tečne i parne faze, kao i određivanju pritiska isticanja (kritičnog pritiska) i faktora klizanja između faza pri kojima se postiže maksimalno isticanje.

Izraz za određivanje kritičnog isticanja dvofazne mešavine se određuje polazeći od energijske jednačine izentropskog strujanja dvofazne mešavine koja je u termičkoj ravnoteži. Strujna neravnoteža se uzima u obzir. Postupak izvođenja je ilustrovan slikom 1. Posmatra se isticanje iz rezervoara u kome je specifična entalpija fluida  $h_0$ .



Slika 1 Isticanje iz rezervoara

Energijska jednačina je napisana u obliku

$$\dot{m}h_0 = \dot{m}_1 \left( h' + \frac{1}{2}u_1^2 \right) + \dot{m}_2 \left( h'' + \frac{1}{2}u_2^2 \right) \quad (1)$$

gde su na desnoj strani jednačine prikazani energija tečnosti (označena indeksom 1) i energija pare (indeks 2). Maseni protok je označen sa  $\dot{m}$ , a brzina sa  $u$ . Uvođenjem protočnog masenog udela pare  $\chi = \dot{m}_2 / \dot{m}$  jed. (1) ima oblik

$$h_0 = (1 - \chi) \left( h' + \frac{1}{2}u_1^2 \right) + \chi \left( h'' + \frac{1}{2}u_2^2 \right) \quad (2)$$

Maseni fluks dvofazne mešavine se određuje kao

$$G = \alpha_1 \rho_1 u_1 + \alpha_2 \rho_2 u_2 \quad (3)$$

gde je veza između zapreminskog udela i protočnog masenog udela pare

$$\alpha_2 = \frac{1}{1 + \frac{1-\chi}{\chi} S \frac{v'}{v''}} \quad (4)$$

gde je faktor klizanja

$$S = u_2/u_1 \quad (5)$$

Parametri u jed. (3,4,5) su definisani u prethodnim predavanjima. Uvođenjem jed. (4) i (5) u (3) dobija se

$$G = \frac{\frac{u_2}{v''}}{\chi + (1-\chi) S \frac{v'}{v''}} \quad (6)$$

Određivanjem brzine pare  $u_2$  iz jed. (1) i uvođenjem u jed. (6) dobija se

$$G^2 = \frac{2}{[\chi v'' + (1-\chi) S v']^2} \frac{h_0 - \chi h'' - (1-\chi) h'}{\chi + \frac{1-\chi}{S^2}} \quad (7)$$

U modelu kritičnog strujanja koji je razvio Moody, određuje se vrednost faktora klizanja  $S$  koja daje najveći maseni fluks dvofazne mešavine  $G$ . U jed. (7) faktor klizanja se javlja u imeniocu, tako da će maseni fluks imati najveću vrednost kada imenilac ima najmanju vrednost u zavisnosti od parametra  $S$ . Diferenciranjem imenioca u jed. (7) po  $S$  i izjednačavanjem sa nulom, dobija se vrednost  $S$  koja daje minimum funkcije u imeniocu. Dobija se vrednost

$$S = \left( \frac{v''}{v'} \right)^{1/3} \quad (8)$$

Smenom jed. (8) u (7) dobija se izraz za određivanje masenog fluksa dvofazne mešavine pri kritičnom isticanju

$$G_{kr} = \left( \frac{2[h_0 - x_{kr} h''_{kr} - (1-x_{kr}) h'_{kr}]}{v_{kr}''^2 \left[ x_{kr} + (1-x_{kr}) \left( \frac{v'_{kr}}{v_{kr}''} \right)^{2/3} \right]^3} \right)^{0,5} \quad (9)$$

gde indeks  $kr$  označava parametre kritičnog strujanja. Takođe, pri izvođenju jed. (9) pretpostaljeno je da je protočni maseni udeo približno jednak stepenu suvoće. U jed. (9) pritisak na mestu kritičnog isticanja se ne pojavljuje eksplicitno, međutim, od njega zavise termodinamički parametri na mestu isticanja. Moody je za određene vrednosti uzvodne entalpije  $h_0$  odredio vrednosti kritičnog pritiska koje daju maksimalni protok isticanja. Primenom ovog postupka za isticanje vode i vodene pare, uočava se da je kritični pritisak  $p_{kr}$  približno jednak 61% od uzvodnog, stagnantnog pritiska  $p_0$

$$p_{kr} = 0,61 \cdot p_0 \quad (10)$$

U cilju pojednostavljenja primene Moody-jevog modela, primenjuje se relacija data jed. (10). Sledi prikaz daljeg postupka proračuna. Stepenu suvoće na mestu kritičnog isticanja  $x_{kr}$  se određuje na osnovu pretpostavke da je ubrzanje dvofaznog strujanja do brzine kritičnog strujanja izentropsko, tako da važi relacija

$$s_{kr} = s_0 \quad (11)$$

Entropija dvofazne mešavine u zapremini iz koje se vrši isticanje je određena kao

$$s_0 = s_0' + x_0 (s_0'' - s_0') \quad (12)$$

a stepen suvoće u zapremini iz koje ističe mešavina

$$x_0 = \frac{h_0 - h_0'}{r_0} \quad (13)$$

gde su specifična entalpija zasićene vode i latentna toplota isparavanja u zapremini iz koje ističe mešavina obeleženi sledstveno sa  $h_0'$  i  $r_0$ .

Na osnovu jednakosti (11) određuje se stepen suvoće na mestu kritičnog isticanja

$$x_{kr} = \frac{s_0 - s_{kr}'}{s_{kr}'' - s_{kr}'} \quad (14)$$

pri čemu su entropije zasićene vode i suvozasićene pare određene pritiskom na mestu kritičnog isticanja  $p_{kr}$ .

U cilju dobijanja pouzdanijeg proračuna, uvode se korekcije zbog termičke neravnoteže pri isticanju:

$$G_{kr} = G_{kr, Moody} \sqrt{\frac{1}{N}} \quad (15)$$

gde je za isticanje iz cevi

$$N = 20x_{kr}, \quad \text{za } x_{kr} < 0,05 \quad (16)$$

$$N = 1 \quad \text{za } x_{kr} \geq 0,05$$

i za isticanje iz mlaznice

$$N = \frac{x_{kr}}{0,14}, \quad \text{za } x_{kr} < 0,14 \quad (17)$$

$$N = 1 \quad \text{za } x_{kr} \geq 0,14$$

Prema standardu **SRPS ISO 4126-1: „Ventili sigurnosti, Deo 1: Opšti zahtevi“ iz 1998. godine**, protok suvozasićene pare se određuje parametarskim jednačinama u zavisnosti od pritiska.

Za pritiske od 1 bar (0,1 MPa) do i uključujući 110 bar (11 MPa)

$$q_{ms} = 0,525 p \quad (18)$$

a za pritiske veće od 110 bar (11 MPa), a manje od 220 bar (22 MPa)

$$q_{ms} = 0,525 p \left( \frac{2,7644 p - 1000}{3,3242 p - 1061} \right) \quad (19)$$

gde je:

$p$  – stvarni apsolutni pritisak isticanja, u barima,

$q_{ms}$  – teorijski protok, u kilogramima na čas po kvadratnom milimetru preseka isticanja.

Protok homogene vlažne pare sa stepenom suvoće od 90 % i više se određuje prema

$$q_{mw} = \frac{q_{ms}}{x} \quad (20)$$

gde je

$q_{mw}$  – protok vlažne pare, u kilogramima na čas po kvadratnom milimetru preseka isticanja,

$x$  – stepen suvoće vlažne pare na ulazu u ventil.

U Tabeli 1 su prikazani rezultati proračuna kritičnog isticanja prema SRPS ISO 4126-1 i Moody-jevim postupkom. Jednačina (20) je korišćena i za proračun sa vrednosti stepena suvoće koje su nešto manje od 0,9 (vrednosti stepena suvoće od 0,85 do 0,9), pošto u standardu nisu dati postupci proračuna za vlažnu paru stepena suvoće manjeg od 0,9.

Tabela 1 Rezultati proračuna kritičnih protoka prema **SRPS ISO 4126-1** i

	Proračun za kritično isticanje sa 160 bar	Proračun za kritično isticanje sa 16 bara	Proračun za kritično isticanje sa 10 bara	Proračun za kritično isticanje sa 5 bara
Pritisak vlažne pare, $p_0$ (bar)	160	16	10	5
Entalpija vlažne pare, $h_0$ (kJ/kg)	2500	2500	2500	2500
Stepen suvoće vlažne pare, $x_0$ , jed. (5)	0,91	0,85	0,86	0,88
<b>Maseni fluks vlažne pare, <math>G_{kr} = q_{mw}</math> (kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), jed. (12)</b>	<b>24167 (27321)<sup>1</sup></b>	<b>2745 (2685)<sup>1</sup></b>	<b>1458 (1675)<sup>1</sup></b>	<b>729 (837)<sup>1</sup></b>

<sup>1)</sup> Vrednosti u zagradi su dobijene Moody-jevim postupkom bez korekcije usled neravnotežnog isparavanja i date su radi poređenja.

Rezultati masenog fluksa u Tabeli 1 pokazuju da maksimalna relativna razlika između vrednosti sračunatih Moody-jevim modelom i standardom nije veća od 15%.