



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Katedra za strojeve i uređaje plovnih objekata

NASTAVNI MATERIJAL IZ KOLEGIJA

LABORATORIJ IZ BRODSKIH STROJEVA

ISPITIVANJE PARNOG KOTLA

(PREDLOŽAK)

Prof. dr. sc. Ante Šestan
Dr. sc. Nikola Vladimir
Ivica Ančić, mag. ing.

Zagreb, 2013.

SADRŽAJ

1.	TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA – OPĆENITO	3
1.1	Uvod	3
1.2	Definiranje temeljnih pojmova u postupku mjeriteljstvu	4
1.3	Vrste mjernih pogrešaka	5
1.4	Značajke mjerača	5
1.5	Iskazivanje mjernog rezultata	6
1.6	Analiza mjernog sustava u proizvodnim uvjetima	6
1.7	Mjerenja u mehanici fluida	6
1.7.1	Mjerenje brzine i protoka fluida	7
1.7.2	Mjerenje tlaka	10
2.	CILJ I METODE ISPITIVANJA PARNOG KOTLA	13
3.	TEHNIČKI OPIS PARNOG KOTLA	14
3.1	Tehnički podaci	14
3.2	Konstruktivske značajke parnog kotla	14
3.3	Regulacijska oprema parnog kotla	14
3.4	Mjerna oprema parnog kotla	14
3.5	Sigurnosna oprema parnog kotla	14
4.	REZULTATI MJERENJA	15
5.	ANALIZA IZGARANJA	17
5.1	Općenito o izgaranju	17
5.2	Gorivo	17
5.2.1	Sastav goriva	17
5.2.2	Ogrjevna moć goriva	18
5.3	Izgaranje	18
5.3.1	Stehiometrijski odnosi	18
5.3.2	Minimalna količina kisika	18
5.3.3	Minimalna količina zraka za izgaranje L_{min}	19
5.3.4	Višak i stvarna količina zraka za izgaranje	19
5.3.5	Količina plinova izgaranja	20
5.3.6	Analiza plinova izgaranja, Orsatov aparat	21
5.3.7	Sastav plinova izgaranja, konstrukcija Ostwaldovog dijagrama (trokuta)	21
5.3.8	Određivanje faktora viška zraka	24
5.3.9	Proračunavanje potrebne količine zraka i količine plinova izgaranja	25
6.	UČIN KOTLA	26
6.1	Parametri proizvedene pare	26
6.2	Određivanje količine pare pomoću mjerne prigušnice	26
6.3	Korigirani učin kotla	27
6.4	Učin kotla „normalne pare“	27
7.	PRORAČUN KORISNOSTI KOTLA	28
7.1	Direktna metoda	28

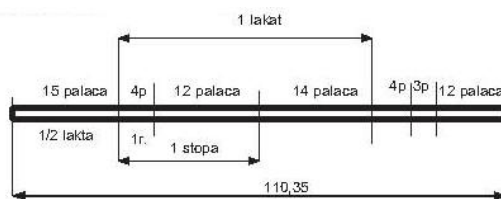
7.2	Indirektna metoda.....	28
8.	MOĆ ISPARAVANJA.....	29
9.	OPTEREĆENJE OGRJEVNIH POVRŠINA	30
9.1	Apsolutno opterećenje ogrjevnih površina.....	30
9.2	Relativno opterećenje ogrjevnih površina.....	30
10.	ZAKLJUČAK.....	31
	LITERATURA	32

1. TEORIJA I TEHNIKA MJERENJA – OPĆENITO

1.1 Uvod

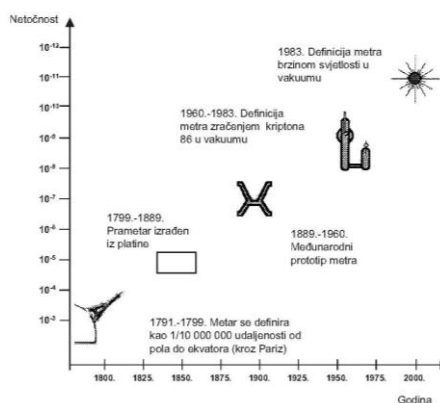
Moderni tehnički sustavi nezamislivi su bez mjerenja u svim fazama (dizajn, eksperimentalni rad, proizvodnja, provjeravanje, održavanje etc.), koja su važna jer osiguravaju objektivnost jer nadilaze razinu osjeta.

Gledajući povijesno, razvoj mjerenja seže u doba drevnih Babilonaca, koji su imali jedinstveni sustav mjera, propisan od strane vladara, prije 4 tisuće godina. Pramjerilo duljine bilo je bakreni štap duljine 110,35 cm i mase 41,5 kg s ucrtanim zarezima, Slika 1, [1].



Slika 1. Pramjerilo duljine [1]

Od tada do danas napravljen je veliki pomak u razvoju teorije i tehnike mjerenja, i kako se može vidjeti, npr. na razvoju mjerne jedinice za duljinu, Slika 2, mjeriteljski postupak je iznimno složen.



Slika 2. Razvoj definicije Metra kao mjerne jedinice duljine [1]

- 1971. – Meridijanski metar, (fizikalni – 1/40000000 dio zemaljskog meridijana), $\pm(150-200) \mu\text{m}$
- 1799. – Arhivski metar, (materijalni – iz platine, određen razmakom krajnjih ploha štapa), $\pm(10-20) \mu\text{m}$
- 1889. – M-prototip, (materijalni – iz slitine 90% platine i 10% iridija određen razmakom između osi dviju srednjih crtica na štapu), $\pm 0,2 \mu\text{m}$
- 1960. – Valni metar, (fizikalni – određen s 1650763,73 duljine vala zračenja kriptona 86), $\pm 0,02 \mu\text{m}$
- 1983. – Laserski metar, (fizikalni – jednak je duljini puta koji svjetlost prijeđe u vakuumu za vrijeme jednog 299792458-og dijela sekunde), $\pm 0,004 \mu\text{m}$

Suvremeno mjeriteljstvo dijeli se na tri kategorije, s obzirom na razine kompleksnosti i točnosti [2]:

- znanstveno mjeriteljstvo – bavi se razvojem i pohranjivanjem mjernih etalon (najviša razina)
- industrijsko mjeriteljstvo – bavi se osiguravanjem ispravnog funkcioniranja mjernih uređaja koji se upotrebljavaju u industriji, proizvodnji id.
- zakonsko mjeriteljstvo – odnosi se na mjerenja koja imaju utjecaj na ekonomske transakcije, zakonsku verifikaciju mjernih uređaja itd.

Što se tiče znanstvenog i industrijskog mjeriteljstva, prema veličinama koje se mjere, mogu se razlučiti sljedeća područja [2]:

- Masa i srodne veličine
 - mjerenje mase
 - sila i tlak
 - obujam i gustoća
- Elektricitet i magnetizam
 - istosmjerne veličine
 - izmjenične veličine
 - VF
 - visoki naponi i velike struje
- Duljina
 - valne duljine i interferometrija
 - dimenzionalno mjeriteljstvo
 - kut, oblici i kakvoća površine
- Vrijeme i frekvencija
- Termometrija
 - kontaktno mjerenje temperature
 - beskontaktno mjerenje temperature
 - vlažnost
- Fotometrija i radiometrija
- Protok
 - protok plinova
 - protok tekućina (maseni, volumenski)
- Akustika, ultrazvuk i vibracije
- Mjerenja u kemiji
 - klinička kemija
 - kemijska svojstva materijala
 - biokemija, mikrobiologija.

1.2 Definiranje temeljnih pojmova u postupku mjeriteljstvu

Temeljni pojmovi mjeriteljstva su [3]:

- Mjerni postupak – skup radnji čija svrha je određivanje vrijednosti fizikalne veličine,
- Mjerena veličina – fizikalna veličina kojoj postupkom mjerenja određujemo vrijednost,
- Mjerni instrument – naprava ili uređaj kojim se provodi postupak mjerenja fizikalne veličine,
- Mjera – element koji utjelovljuje neku mjernu veličinu (primjerice uteg),
- Mjerna jedinica – dogovorena količina fizikalne veličine s kojom se uspoređuje mjerna veličina kako bi se saznala njena vrijednost. Može ju se definirati i kao dogovorom

prihvaćenu posebnu veličinu koja služi za kvantitativno iskazivanje veličina iste dimenzije,

- Mjerna metoda – način kojim se u postupku mjerenja dolazi do vrijednosti mjerne veličine. Može ju se definirati i kao logički općenito opisan slijed djelovanja, koji se rabi za provedbu mjerenja, a može biti izravan ili neizravan,
- Mjerni rezultat – brojčana vrijednost (vrijednost dobivena mjerenjem) koja opisuje koliko je puta mjerena veličina veća ili manja od mjerne jedinice,
- Mjerni lanac – niz uređaja i instrumenata koji fizikalnu veličinu pretvaraju u električnu, te instrumenta s pomoću kojega se ova veličina mjeri (očitava), registrira ili pohranjuje.

1.3 Vrste mjernih pogrešaka

Vrste mjernih pogrešaka prikazane su u Tablici 1.

Tablica 1. Vrste mjernih pogrešaka i njihovi uzroci i posljedice

	MJERNE POGREŠKE		
	Sustavne	Slučajne	Grube
Uzroci	metoda, konstrukcija, okolina, deformacije, istrošenost	nesavršenost uređaja i osjetila, promjenjivost okoline, neiskustvo	nepažnja mjeritelja, loša podešenost, neispravnost mjerila
Posljedice	netočnost rezultata	nepouzdanost rezultata	mjerni rezultat se odbacuje

Karakteristika sustavnih pogrešaka je da u tijeku ponovljenih mjerenja iste veličine ostaju stabilne ili se mijenjaju na predvidiv način, dok slučajne pogreške karakterizira njihova promjena na nepredvidiv način. Kada u tijeku ponovljenih mjerenja iste veličine značajno odstupaju u odnosu na ostale rezultate, radi se o grubim pogreškama mjerenja.

1.4 Značajke mjerila

Prema [1] osnovne značajke mjerila su sljedeće:

- Nazivno područje – područje pokazivanja koje se obično izražava svojom gornjom i donjom granicom,
- Raspon – apsolutna vrijednost razlike između dviju granica nazivnog područja,
- Nazivna vrijednost – zaokružena približna vrijednost značajke mjerila koja služi kao uputa za njegovu uporabu (paralelna gr. mjerka 100 mm),
- Mjerno područje – skup vrijednosti mjerenih veličina za koje se pogreška mjerila mora nalaziti unutar navedenih granica,
- Granični uvjeti – krajnji uvjeti koje mjerilo mora izdržati bez oštećenja i bez gubljenja mjeriteljskih značajki u radu pod određenim radnim uvjetima,
- Osjetljivost – promjena odziva mjerila podijeljena s odgovarajućom promjenom poticaja,
- Prag osjetljivosti – najveća promjena (spora i jednolična) poticaja koja ne izaziva zamjetnu promjenu odziva,
- Razlučivanje – najmanja razlika između pokazivanja pokaznog uređaja koja se može jasno zamijetiti,
- Područje neosjetljivosti – najveći raspon u kojem se poticaj može promijeniti u oba smjera, a da ne izazove promjenu odziva mjerila,
- Stabilnost – sposobnost mjerila da održava svoje mjeriteljske značajke stalnim u vremenu,

- Slabljenje mjeriteljskih značajki (eng. *drift*) – spora promjena mjeriteljskih značajki mjerila
- Točnost mjerila – sposobnost mjerila da daje odzive bliske istinitoj (referentnoj) vrijednosti,
- Razred točnosti – razred mjerila koja zadovoljavaju zahtjeve kojima je svrha održavanje pogrešaka u navedenim granicama.
- Granična pogreška – krajnje vrijednosti pogreške dopuštene specifikacijama, propisima itd., za određeno mjerilo.

1.5 Iskazivanje mjernog rezultata

Uz iskazivanje mjernog rezultata, potrebno je jasno naznačiti odnosi li se on na ispravljeni rezultat, neispravljeni rezultat, ili pak na prosjek više vrijednosti [1]. Potpuna mjeriteljska informacija (iskazivanje rezultata mjerenja) zahtijeva i izražavanje podataka o mjernoj nesigurnosti, koja se javlja kao posljedica djelovanja slučajnih utjecaja i ograničenih mogućnosti korigiranja slučajnih djelovanja.

Neispravljeni mjerni rezultat predstavlja rezultat prije ispravljanja sustavne pogreške, dok je ispravljeni rezultat onaj dobiven nakon njenog ispravljanja.

Mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja kojim se opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se opravdano moglo pripisati mjerenoj veličini. Korekcijski faktor je broj kojim je potrebno pomnožiti mjerni rezultat da bi se nadoknadila sustavna pogreška.

1.6 Analiza mjernog sustava u proizvodnim uvjetima

Osnovna pitanja koja se pojavljuju u analizi mjernog sustava u proizvodnim uvjetima su sljedeća [1]:

- ima li mjerni sustav zadovoljavajuće razlučivanje?
- je li mjerni sustav stabilan?
- je li mjerni sustav sposoban za kontrolu procesa (proizvoda)?

Potreba za analizom mjernog sustava javlja se:

- pri preuzimanju nove mjerne opreme,
- pri usporedbi mjernih karakteristika različitih mjernih sredstava,
- pri utvrđivanju sustavnih pogrešaka,
- pri usporedbi mjernih značajki prije i poslije popravka mjerne opreme,
- pri određivanju sastavnica za izračunavanje varijacija procesa mjerenja i ocjenjivanja prihvatljivosti za kontrolu proizvodnog procesa.

1.7 Mjerenja u mehanici fluida

Mjerenja povezana s brodskim strojevima i uređajima često su vezana uz mjerenja u mehanici fluida. Fizikalne veličine primarne za područje mehanike fluida su tlak, brzina, protok i razina kapljevine [3]. Ostale fizikalne veličine koje se također pojavljuju u ovom području se ne razmatraju (gustoća fluida, viskoznost, i dr.). Mjerenje fizikalne veličine načelno se može provesti direktno i indirektno. Sve navedene veličine su izvedene veličine, tj. nijedna od njih nije definicijska veličina SI sustava. Ni jedna od njih ne može se mjeriti direktno, neposredno, već indirektno, posredno, s pomoću drugih veličina ili prirodnih pojava pogodnih za mjerenje.

U praksi se najčešće susreće posredno mjerenje fizikalnih veličina pomoću nekoga prirodnog fenomena, pa ovdje razmatramo upravo takva mjerenja, tim više što je danas uobičajeno svaku fizikalnu veličinu pretvoriti u električnu i potom takvu mjeriti. To se čini radi

praktičnosti takvih mjerenja i širokih mogućnosti koje se njima otvaraju primjenom računalne tehnike [3].

Kada se govori o mjernom lancu u kontekstu mjerenja u mehanici fluida, razlikuju se analogni i digitalni mjerni lanci. Analogni se mjerni lanac sastoji od osjetnika, pretvarača i pokaznog instrumenta (ili/i registracijskih uređaja). Digitalni se mjerni lanac sastoji također od osjetnika i pretvarača, no slijedi analogni/digitalni pretvarač i računalo.

Osjetnik je naprava kojom se fizikalna mjerna veličina u većoj ili manjoj mjeri izolira od utjecaja ostalih s njom spregnutih veličina u fizikalnom polju promatranog događaja.

Pretvarač na ovaj način pripremljenu fizikalnu veličinu pretvara u neku lako mjerljivu mehaničku ili električnu veličinu (pomak, zakret, struja, napon, otpor, kapacitet, induktivitet i sl.). Ova se pretvorba obično izvodi primjenom neke fizikalne pojave (deformacija, indukcija i sl.). Zbog toga što se danas u praksi pretežno rabe električni pretvornici, oni se u praksi nazivaju električnim pretvaračima.

Pokazni instrument analogni je instrument kojim je moguće mjeriti predmetnu električnu veličinu, najčešće sa skalom (ljestvicom) već kalibriranom na iznos mjerene fizikalne veličine. U novije vrijeme se pojavljuju i digitalni i analogni instrumenti koje je lakše očitavati, pa otpadaju pojedinačne pogreške očitavanja (paralaksa i sl.).

Registrirajući instrument nasuprot ovome bilježi posrednu analognu električnu veličinu, pa je zbog toga poslije potrebno ove podatke podvrgnuti naknadnoj obradi, to jest pretvorbi posredne veličine u mjerenu fizikalnu veličinu.

Između ovih osnovnih elemenata mjernog lanca često je potrebno ugraditi i različite pomoćne uređaje, kao što su razni linearizatori, integratori, napojne jedinice i sl.

Analogno/digitalni pretvarač uređaj je koji analognu pomoćnu električnu veličinu pretvara u digitalni (računalu razumljivi) signal. Zbog načina ove pretvorbe, to jest radi periodičnog očitavanja analognog signala i njegova pretvaranja u odgovarajući digitalni signal (skeniranje-uzorkovanje), važno je brinuti se za brzinu uzorkovanja, to jest za veličinu frekvencije ove periodičnosti. Ova frekvencija mora biti za red veličine veća od frekvencije osnovne fizikalne veličine koja se mjeri.

Digitalizirani signal sada, umjesto na pokazni ili registrirajući instrument (kao kod analogne metodike), odlazi izravno u memoriju računala, gdje ga je moguće podvrgnuti automatskoj obradi (preračunavanju) sukladno zahtjevima mjernika.

Metode mjerenja mogu se promatrati sa stajališta mjernog osjetnika (način mjerenja) i sa stajališta mjernog pretvornika (način pretvorbe). Odvajanjem načina mjerenja od načina pretvorbe mjerene fizikalne veličine dalje će se razmatrati problematika mjerenja u mehanici fluida.

Načini mjerenja opisuju različite metode fizičkog pristupa pojedinoj fizikalnoj veličini koja se želi mjeriti i njezinu izdvajanje (izolaciji) od ostalih fizikalnih veličina koje čine promatrano polje fizikalne pojave. Mjerni se osjetnici u MF često nazivaju sondama.

Općenito, kad je riječ o mjerenjima brzine strujanja fluida i protoka, može se reći da se ona vrlo usko povezana, tj. da se jedne veličine mogu jednostavno odrediti iz drugih.

1.7.1 Mjerenje brzine i protoka fluida

Načini mjerenja brzine su:

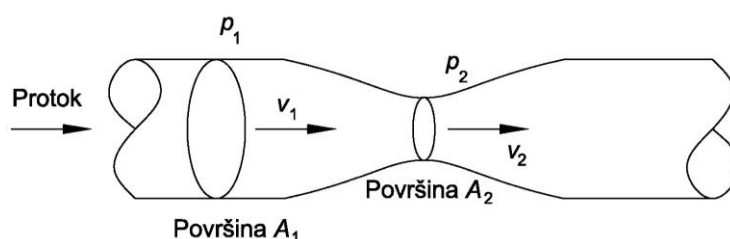
- Mjernom blendom
- Mjernom sapnicom
- Venturijevom cijevi
- Pitot-Prandtlovom cijevi
- Turbinskim mjeracima protoka
- Krilnim anemometrom

- Anemometrom s toplom žicom
- Ultrazvučne metode mjerenja brzine i protoka
 - metoda mjerenja prolaznog vremena
 - impulsna metoda
 - unakrsna metoda
 - mjerenje brzine i protoka temeljeno na Dopplerovom efektu

Postoje i drugi načini mjerenja spomenutih veličina, a u daljnjem tekstu, dan je osvrt samo na odabrane načine mjerenja, koji su važniji, gledajući u kontekstu kolegija.

Mjerna blenda, mjerna sapnica, Venturijeva cijev i Pitot-Prandtlova cijev spadaju u tzv. mjerače protoka/brzine putem diferencijalnog (različitog) tlaka. Kada se u cijevi kroz koju protječe fluid na određenom mjestu nalazi suženje, različit tlak će se javiti u dijelu suženja cijevi i on je ovisan o brzini (volumenskom protoku). Stoga je potrebno izračunati brzinu (volumenski protok) iz diferencijalnog tlaka). Osnovna jednačba (Bernoullijeva) za sve tzv. mjerače diferencijalnog protoka, Slika 3, glasi:

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 + \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + \frac{p_2}{\rho_2} . \quad (1.1)$$

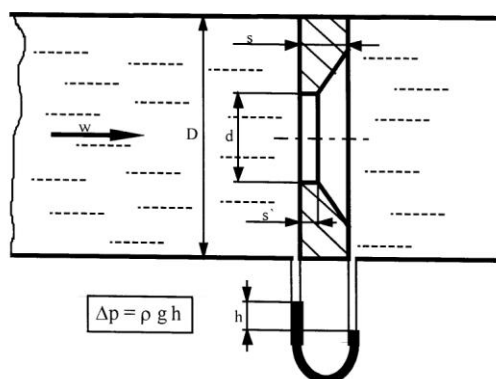


Slika 3. Osnova rada mjerača protoka diferencijalnog tlaka

Mjernom blendom, Slika 4, mjeri se pad tlaka koji nastaje pri prolasku plina kroz mjernu blendu, i brzina se računa prema formuli [4]:

$$w = \alpha \varepsilon \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} , \quad (1.2)$$

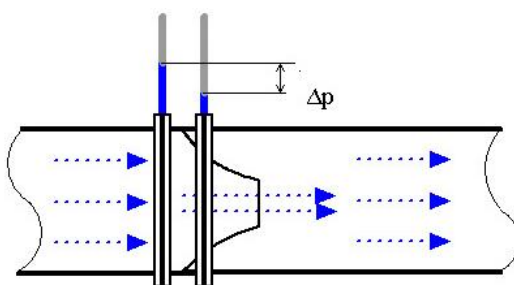
gdje je α - koeficijent protoka blende, ε - koeficijent ekspanzije (uvodi se ukoliko se razmatra strujanje pare ili plina), ρ gustoća fluida koji protječe, Δp - razlika tlaka prije i poslije mjerne blende.



Slika 4. Mjerna blenda [4]

Detalji o određivanju koeficijenta protoka blende α i koeficijenta ekspanzije ε raspoloživi su u [4].

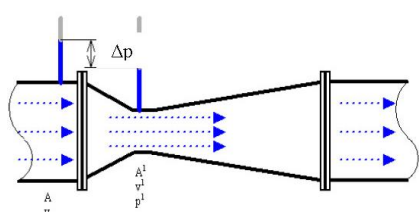
Mjerna sapnica, Slika 5, se upotrebljavaju mnogo rjeđe od mjernih blendi. Njena je osnovna prednost što ima manje gubitke uslijed trenja, što rezultira manjim nepovratnim padom tlaka. Osim toga veća je i količina protjecanja od one kakva se kod istog promjera i pod istim uvjetima postiže upotrebom mjerne blende. Sapnica se može upotrijebiti za mjerenje protoka lagano muljevitih fluida.



Slika 5. Mjerna sapnica [4]

Za mjernu sapnicu, kao i za mjernu blendu, vrijedi izraz (1.2), samo što koeficijenti poprimaju različite vrijednosti, a ona se obično upotrebljava za mjerenja protoka na cjevovodima čiji je promjer veći od 50 mm.

Venturijeve cijevi, Slika 6, rabe se za mjerenje protoka preko 120 godina, a prema konstrukciji razlikuju se njihove kratke i duge izvedbe. Prema [4] preko padova tlakova može se izračunati brzina strujanja fluida, iako je osnovna namjena određivanje protoka. Raznovrsne konstrukcije izrade Venturijevih cijevi otežavaju standardizaciju proračunskih koeficijenata. U odnosu na mjernu blendu i sapnicu, Venturijeva cijev uzrokuje najmanji nepovratni pad tlaka tj. najmanje gubitke energije. Prednosti Venturijevih cijevi su upravo najmanji gubici strujanja i mogućnost mjerenja protoka tekućina u kojima ima krutih tvari, ali pod uvjetom da je odnos količine krutih tvari prema količini tekućine konstantan, dok su im nedostaci glomaznost i visoka cijena.



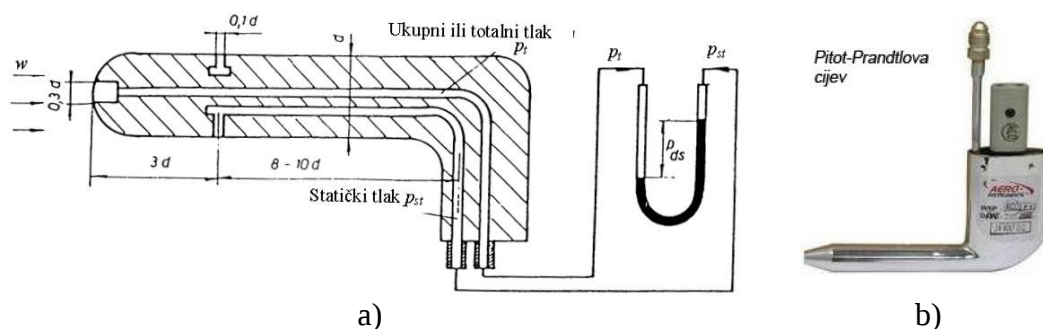
Slika 6. Primjeri Venturijeve cijevi

Pitot-Prandtlova cijev, Slika 7, spada jednu od najrasprostranjenijih metoda za mjerenje brzine strujanja, odnosno protoka. Mjere se statički i totalni tlak, a dinamički tlak i brzina se izračunaju prema sljedećim izrazima:

$$p_d = p_t - p_{st}, \quad (1.3)$$

$$w = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}}, \quad (1.4)$$

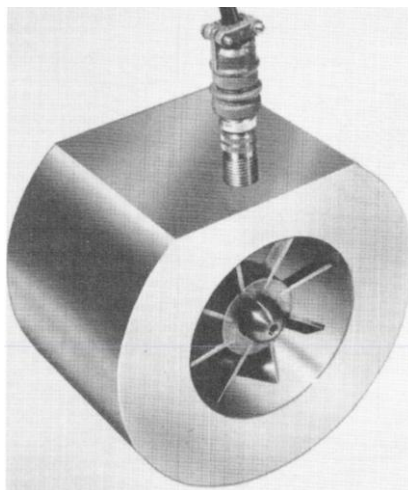
gdje su: p_t - totalni (ukupni) tlak, p_{st} - statički tlak, p_d - dinamički tlak.



Slika 7. Pitot-Prandtlrova cijev, a) skica, b) slika stvarne izvedbe

Glavne prednosti Pitot-Prandtlove cijevi su: njena neosjetljivost, robusnost i relativno niska cijena u odnosu na druge metode i instrumente mjerenja brzine strujanja, jednostavno rukovanje i montaža na mjerno mjesto, pogodna je za mjerenja u vrtložnim strujanju, relativno velika osjetljivost kod malih brzina strujanja [4].

Turbinski mjerači protoka, Slika 8, sastoje se od male turbine (najčešće s 4 krila/lopaticice), a brzina njenog okretanja proporcionalna je brzini fluida. Krila turbine izrađuju se od feromagnetičkog metala i prolaskom kraj magnetskog detektora induciraju magnetski tok (fluks). Magnetski detektor djeluje kao pretvornik promjenjivog magnetskog toka koji se dalje pomoću Schmitovog prekidača i pretvarača frekvencije u napon transferira u izlazni napon koji je proporcionalan brzini protoka fluida. Preciznost im je unutar 0,5%, pri čemu valja napomenuti da se pri malim protocima mogu javljati problemi s trenjem na rotoru, pa se redovito deklarira koliko malen protok mogu mjeriti. Dosta su skupi budući da imaju rotor kao pokretni dio i više su podložni oštećenjima nego mjerači protoka diferencijalnog tlaka.

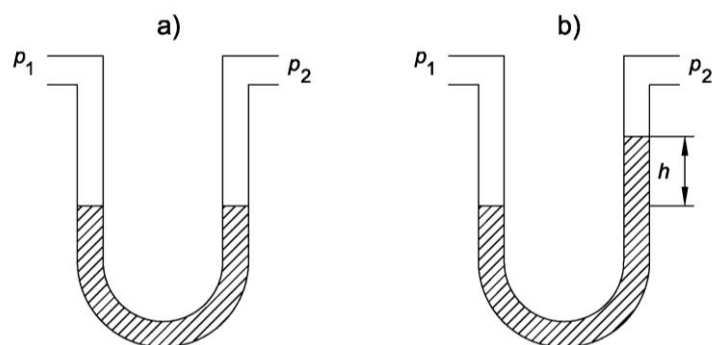


Slika 8. Turbinski mjerač protoka

1.7.2 Mjerenje tlaka

U mehanici fluida razlikuju se statički tlak i (tlak fluida u mirovanju) i dinamički tlak (ovisan o brzini protoka). Njihov zbroj daje ukupni tlak u struji fluida. Kada se govori o atmosferskom tlaku, on se mjeri barometrom, dok se tlak fluida u zatvorenom sustavu mjeri manometrom (mjeri se pretlak kao razlika unutarnjeg tlaka i atmosferskog tlaka). Postoji čitav niz izvedbi manometara koji se danas koriste.

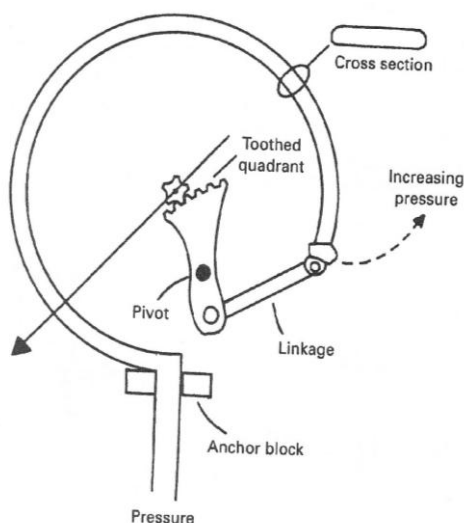
Manometri u obliku U cijevi, Slika 9, nude korisnu informaciju o temeljnim principima mjerenja tlaka. U manometar je ispunjen nekom tekućinom (vodom, alkoholom, živom) i spojen je na svojim krajevima na ulaze različitih tlakova p_1 i p_2 .



Slika 9. U manometar, a) $p_1=p_2$, b) $p_1>p_2$

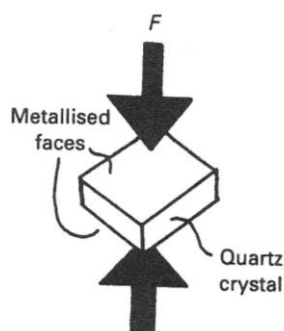
Postoje i tzv. manometri nejednakih površina, koji su konstruirani s nejednakim površinama fluida u cijevima, kao i tzv. kosi manometri (osjetljivi pri mjerenju niskih tlakova).

Bourdonova cijev, Slika 10, je uređaj za mjerenje tlaka koji je razmjerno dugo u uporabi i pogodan je za mjerenje visokih i niskih tlakova. Rade na način da se pomak cijevi uslijed tlaka fluida prenosi pomoću spoja i nazubljenog dijela na zupčanik pokazivača tlaka. Bourdonovu cijev pogodno je spojiti na potenciometar, kako bi mogla dati signal u obliku električnog napona.

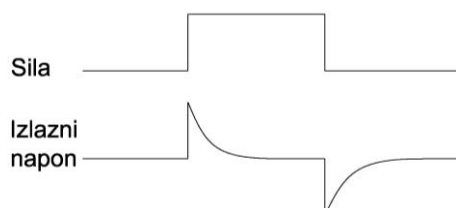


Slika 10. Bourdonova cijev

Piezo elementi rade na principu piezo-električnog efekta koji se odvija u kristalima kvarca, Slika 11. Naime, kada se na obrađeni kvarc nanese sila, električni naboj suprotnog polariteta, pojavljuje se na površinama kristala, koji se zatim pretvara u upotrebljivi električni napon kao izlazni signal, Slika 12. Piezo-električni pretvornici su iznimno pogodni za mjerenje dinamičkog tlaka jer imaju vrlo brzi odziv, te vrlo lako prate varijacije mjerenog tlaka (npr. u poklopcu cilindra motora s unutarnjim izgaranjem).



Slika 10. Piezo-električni efekt



Slika 11. Ulazni i izlazni signal piezo-električnog pretvarača

Naposljetku, za mjerenje tlaka se može primijeniti **Pitot-Prandtlova cijev**, Slika 7, pri čemu valja napomenuti ona spada u tzv. mjerne diferencijalnog tlaka i da istovremeno mjeri totalni i statički tlak. Važno je istaknuti da se dinamički tlak u cijevnim sustavima ne može izravno izmjeriti (jer se ne može isključiti njegov utjecaj), već se dobiva kao razlika totalnog i statičkog. Pitot-Prandtlova cijev postavlja se tako da se usmjeri svojim otvorom prema struji fluida i na tom čeonom otvoru (zaustavnoj točki) koji je spojen s jednim krajem diferencijalnog manometra mjeri veličinu totalnog tlaka a bočni otvori koji su okomiti na struju fluida spojeni su na drugi kraj diferencijalnog manometra koji mjeri veličinu statičkog tlaka koji vlada u struji fluida i koji ne ovisi o brzini fluida. Tako spojen manometar pokazuje tlak koji je razlika totalnog i statičkog tlaka tj. manometar pokazuje upravo dinamički tlak koji se javlja kao posljedica pretvaranja kinetičke energije struje u potencijalnu energiju koja se manifestira porastom dinamičkog tlaka.

2. CILJ I METODE ISPITIVANJA PARNOG KOTLA

Parni kotao je termoenergetski uređaj koji služi za proizvodnju vodene pare iz napojne vode. Količina topline koja je potrebna za proizvodnju vodene pare dobiva se izgaranjem goriva u ložištu kotla. Parni kotao koji služi za proizvodnju vlažne ili suhozasićene pare sastoji se od parnog bubnja, vodenih komora, ložišta i isparivačkih cijevi. Isparivačke cijevi čine isparivačku površinu preko koje se vrši izmjena topline između plinova izgaranja s jedne strane i napojne vode i pare s druge strane cijevi. Ako kotao služi za proizvodnju pregrijane pare, tada pored spomenutog isparivačkog sustava ima i pregrijač i međupregrijač pare i (najčešće) predgrijače zraka i napojne vode. Tada se radi o složenijem termoenergetskom uređaju kojega zovemo **generator pare**. Generator pare sa pomoćnim strojevima i uređajima za dovod goriva, dovod napojne vode i zraka, odvođenje produkata izgaranja, odsis plinova izgaranja, regulaciju i mjerenje čini **postrojenje generatora pare**.

U brodograđevnoj praksi ispitivanje parnog kotla odvija se u 2 faze:

- Ispitivanje i kontrola kod proizvođača, koje se sastoji od kontrole projektno-konstrukcijske dokumentacije i od kontrole materijala i proizvodnih procesa. Ispitivanje i kontrolu provodi nadležno klasifikacijsko društvo (Registar).
- Ispitivanje na mjestu ugradnje, tj. na brodu, koje se sastoji od funkcionalne probe („topla proba“) i dokazivanja učina kotla i korisnosti (probna vožnja).

CILJ ISPITIVANJA

Ispitivanje parnog kotla na mjestu ugradnje služi za dokazivanje učina (D) i korisnosti kotla (η_K).

METODE ISPITIVANJA

Metode ispitivanja utvrđene su sa propisima nadležnih klasifikacijskih društava (npr. HRB, LR, GL, DNV, BV i sl.) ili sa propisima nekih drugih ovlaštenih institucija (npr. VDI, ASTM, ASME i sl.). Opseg i metode ispitivanja treba poznavati već kod projektiranja kotla, radi toga da se predvide mjesta za ugradnju potrebne mjerne opreme.

Ispitivanje se vrši tek nakon uspješno završenog probnog pogona, tj. nakon uspješno obavljene funkcionalne probe kotla i svih uređaja koji opslužuju kotao.

Osim ispitivanja učina i korisnosti mogu se ispitati i druge značajke, kao npr. ponašanje kotla kod promjenjivog opterećenja.

Za određivanje učina i korisnosti služimo se metodom mjerenja i proračunavanja na temelju izmjerenih veličina.

Vrste mjerenja:

1. Parametri pare (p , T) na izlazu iz kotla
2. Učin kotla
3. Masa utrošenog goriva
4. Temperatura plinova izgaranja na izlazu iz kotla
5. Temperatura zraka na ulazu u ložište kotla
6. Temperatura napojne vode
7. Sastav plinova izgaranja na izlazu iz kotla
8. Tlak (pretlak i potlak) plinova izgaranja i zraka na raznim mjestima u kotlu
9. Određivanje pojedinih gubitaka
10. Određivanje potrošnje energije pomoćnih uređaja (pumpe, ventilatori i sl.)

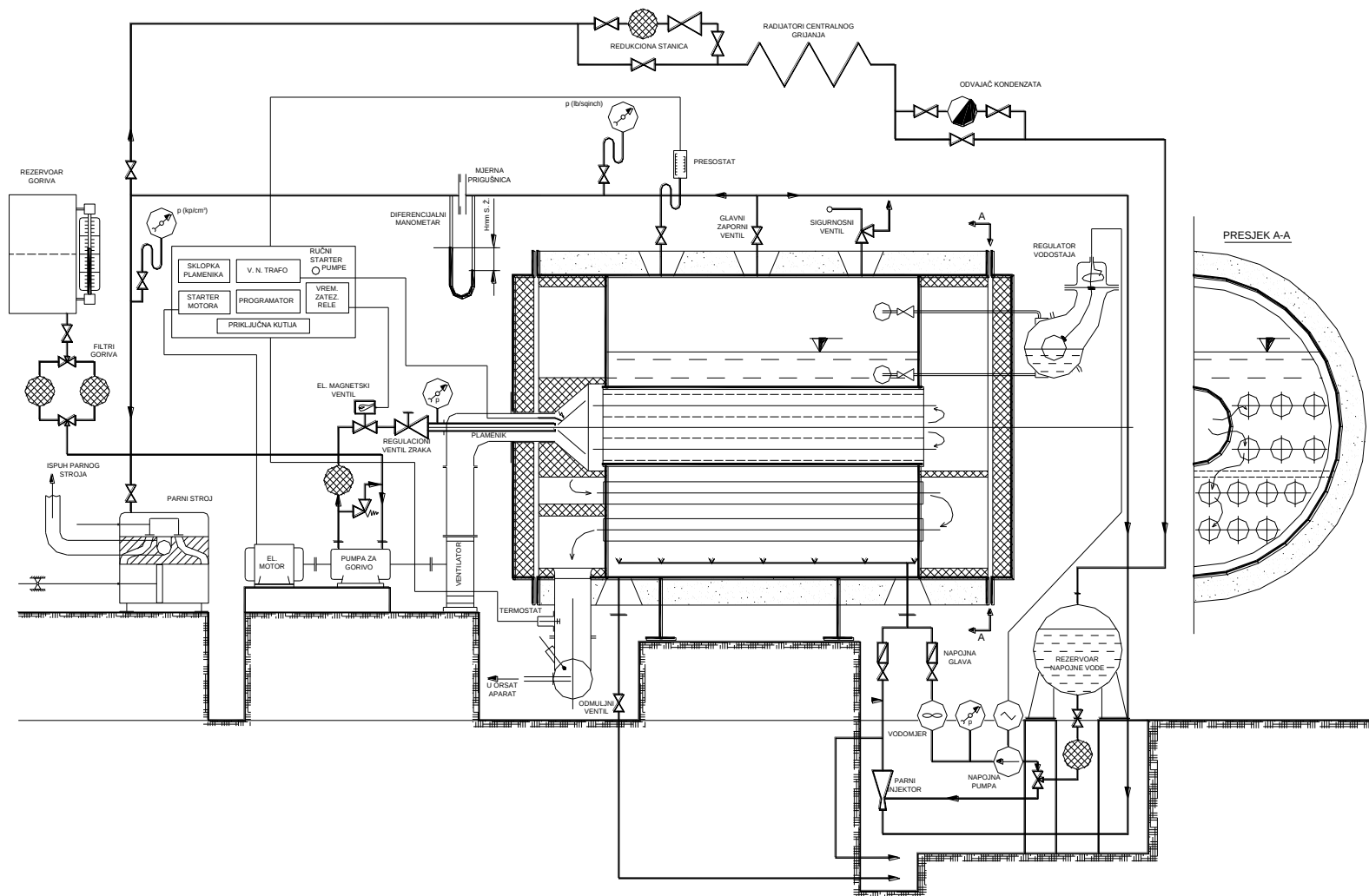
3. TEHNIČKI OPIS PARNOG KOTLA

3.1 Tehnički podaci	
Proizvođač	CLEAVER-BROOKS COMPANY, Milwaukee, Wisconsin, USA
Model	OB 1 1/2 , light oil
Tvornički broj	95148
Godina gradnje	1947.
Godina montaže	1953.
Koncesioni tlak	7×10^5 Pa
Nominalni učin kotla	$D_N = 200$ kg/h “normalne pare”
Tlak pare na izlazu iz kotla	$p \leq 7 \times 10^5$ Pa, suho zasićena para
Ogrjevna površina isp.	$13,84 \text{ m}^2$
Tlak raspršivanja	$p_g = 7 \times 10^5$ Pa
Priključak na el mrežu	izmjenična struja, jednofazni priključak, 220 V, 50 Hz
3.2 Konstrukcijske značajke parnog kotla	
Tip kotla	dimocijevni
Broj plamenica	1
Broj prolaza	4
Gorivo	lako loživo ulje (dizel gorivo D-2)
Propuh	prisilan, s ložištem pod tlakom
Gorionik	potpuno automatiziran rad, upućivanje i paljenje programirano
Puštanje u pogon	pomoću ručnog startera
Regulacija opterećenja	uključivanjem/isključivanjem gorionika
3.3 Regulacijska oprema parnog kotla	
Presostat Nivosklopka Elektromagnetski ventil za gorivo Termostat u dimovodu Sklopka gorionika Starter motora gorionika Programator gorionika Vremenski relej Visokonaponski transformator Priključna kutija	
3.4 Mjerna oprema parnog kotla	
Termometri Kalibrirana posuda za gorivo Vodomjer Diferencijalni tekućinski manometar Manometar Mjerna prigušnica Orsatov aparat	
3.5 Sigurnosna oprema parnog kotla	
Sigurnosni ventil Nivosklopka Termostat u dimovodu	

4. REZULTATI MJERENJA

MJERENA VELIČINA	R.BROJ ISPITIVANJA	1	2	3	4	5	6	7	SREDNJA VRIJEDNOST	SI	
	VRIJEME MJERENJA	10. ⁰⁰	10. ⁰⁵	10. ¹⁰	10. ¹⁵	10. ²⁰	10. ²⁵	10. ³⁰			
	MJERNA JEDINICA									IZNOS	MJERNA JEDINICA
BAROMETARSKI TLAK P_0	mm Hg	752,3	752,5	752,4	752,3	752,4	752,5	752,4			
TEMPERATURA OKOLINE t_0	°C	20,0	20,5	20,5	21,0	21,5	21,5	21,5			
TEMP. NAPOJNE VODE t_v	°C	33,0	33,2	33,5	34,0	34,2	34,6	35,1			
STANJE MJERILA NAPOJNE VODE	l	10110	10125	10138,5	10152,5	10166,5	10180	10193,5			
UTROŠAK NAPOJNE VODE	l										
STANJE MJERILA GORIVA	l	30,15	28,85	27,6	26,4	25,15	23,92	22,75			
UTROŠAK GORIVA	l										
TEMPERATURA PLINOVA IZGARANJA t_i	°C	263	267	268	269	271	272	271			
PRETLAK PARE P_K	BAR	2,45	2,48	2,48	2,53	2,56	2,56	2,53			
VRIJEDNOST OČITANJA Δh NA DIFERENC. MANOMETRU	mm	105,5	106	107	105,5	108	108,5	110			
UDJEL "CO" U PLINOVIMA IZGARANJA, k_v	%	0,3	0,3		0,2		0,1				
UDJEL "CO ₂ " U PLINOVIMA IZGARANJA, k_v	%	12,5	13,0		13,0		13,5				
UDJEL "O ₂ " U PLINOVIMA IZGARANJA, O_v	%	3,5	3,0		2,5		2,5				

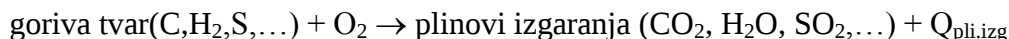
BRODSKI STROJEVI, LABORATORIJSKE VJEŽBE, ISPITIVANJE PARNOG KOTLA;
DISPOZICIJA KOTLOVSKOG POSTROJENJA



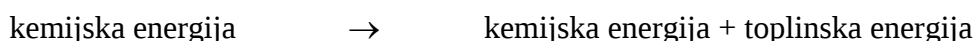
5. ANALIZA IZGARANJA

5.1 Općenito o izgaranju

Izgaranje je kemijska reakcija u kojoj element gorive tvari reagira s kisikom. Reakcija se odvija u skladu s “Zakonom o održanju mase tvari” i definiranim stehiometrijskim odnosima. Produkt kemijske reakcije izgaranja su plinovi izgaranja i toplinska energija.



Jednadžba energetske ravnoteže kod izgaranja:



U realnim procesima izgaranja stehiometrijski potrebna količina kisika nije dovoljna za potpuno izgaranje u određenom vremenu. Zbog toga se u realnim procesima mora dovoditi višak kisika s ciljem da se izgaranje što je moguće više približi potpunom izgaranju.

Potpuno izgaranje: elementi gorive tvari izgaraju potpuno u skladu s stehiometrijskim odnosima.

Nepotpuno izgaranje: pojedini elementi gorive tvari ne izgaraju potpuno, već stvaraju monoksidi, npr. CO.

5.2 Gorivo

- Vrsta goriva: ekstra lako ulje za loženje
- Viskozitet: $1,6^0 \text{ E } (20^0) = 7,41 \text{ cSt}$
- Gustoća: $\rho_{15^0 \text{ C}} = 810 \text{ kg/m}^3$
- Volumenski koef. topl.istezanja: $\beta = 9,2 \times 10^{-4} \text{ 1/K}$

5.2.1 Sastav goriva

Elementarnom analizom goriva utvrđeni su slijedeći maseni udjeli pojedinih elemenata i tvari u gorivu:

- $c = 0,865 \text{ kg/kg}$
- $h = 0,125 \text{ kg/kg}$
- $o = 0,004 \text{ kg/kg}$
- $n = 0,001 \text{ kg/kg}$
- $s = 0,004 \text{ kg/kg}$
- $w = 0,001 \text{ kg/kg}$
- $a = 0 \text{ kg/kg}$

Kod toga vrijedi odnos masenih udjela definiran s izrazom :

$$c+h+o+n+s+a+w = 1$$

gdje su :

- $c, h, o, \dots$ maseni udjeli elemenata u 1 kg goriva (kg/kg)

- a = maseni udio pepela
- w = maseni udio vode (vlage)

5.2.2 Ogrjevna moć goriva

Ogrjevna moć goriva je količina topline koja se oslobađa kod potpunog izgaranja masene jedinice goriva.

Gornja ogrjevna moć H_g je količina topline koja se oslobađa izgaranjem masene jedinice goriva, a produkti izgaranja se hlade na temperaturu 293 K. Pri tome se kondenzira vodena para koja potječe od vlage sadržane u gorivu kao i voda koja nastaje izgaranjem vodika iz goriva i pri tome oslobađa toplinu isparavanja.

Donja ogrjevna moć H_d je količina topline koja se oslobađa izgaranjem masene jedinice goriva, a vodena para koja je prisutna u plinovima izgaranja se ne kondenzira već izlazi s plinovima izgaranja.

Ogrjevna moć goriva određuje se:

- eksperimentalno, pomoću “kalorimetrijske bombe”
- empirijskim formulama na temelju podataka iz elementarne analize goriva

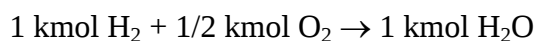
U ovoj analizi izgaranja koristiti će se empirijska formula MENDELJEEV-a za izračunavanje H_d :

$$H_d = 33,9c + 125,5h - 10,9(o - s) - (9h + w) \quad \text{MJ/kg}$$

5.3 Izgaranje

5.3.1 Stehiometrijski odnosi

- kod potpunog izgaranja



- kod nepotpunog izgaranja



5.3.2 Minimalna količina kisika

$O_{\min}$ = stehiometrijska količina kisika potrebna za potpuno izgaranje

$$1) \quad O_{\min, \text{km}} = \frac{c}{12} + \frac{1}{4} \left(h - \frac{o}{8} \right) + \frac{s}{32} \quad \text{kmol/kg}$$

$$2) \quad O_{\min, \text{m}} = 2,667c + 8 \left(h - \frac{o}{8} \right) + s \quad \text{kg/kg}$$

$$3) \quad O_{\text{Min},n} = 1,867c + 5,6\left(h - \frac{o}{8}\right) + 0,7s \quad \text{mn}^3/\text{kg}$$

O'_{min} = minimalna količina kisika potrebna za **selektivno izgaranje**

Selektivno izgaranje je teoretski pretpostavljena vrsta izgaranja kod kojega ukupna masa ugljika C nepotpuno izgara u ugljični monoksid CO, a vodik H_2 i sumpor S izgaraju potpuno i to s količinom zraka L_{min} i $\lambda = 1$.

$$1) \quad O'_{\text{Min},km} = \frac{c}{24} + \frac{1}{4}\left(h - \frac{o}{8}\right) + \frac{s}{32} \quad \text{kmol/kg}$$

$$2) \quad O'_{\text{Min},m} = 1,333c + 8\left(h - \frac{o}{8}\right) + s \quad \text{kg/kg}$$

$$3) \quad O'_{\text{Min},n} = 0,933c + 5,6\left(h - \frac{o}{8}\right) + 0,7s \quad \text{mn}^3/\text{kg}$$

5.3.3 Minimalna količina zraka za izgaranje L_{min}

Sastav zraka, volumenski odnos:

- 21% O_2
- 79% N_2

Sastav zraka, maseni odnos:

- 23,2 % O_2
- 76,8 % N_2

$$L_{\text{min},m} = \frac{O_{\text{min},m}}{0,232} \quad \text{kg/kg}$$

$$L_{\text{min},n} = \frac{O_{\text{min},n}}{0,21} \quad \text{mn}^3/\text{kg}$$

5.3.4 Višak i stvarna količina zraka za izgaranje

$$\lambda = \frac{L}{L_{\text{min}}} = \frac{L_m}{L_{\text{min},m}} = \frac{L_n}{L_{\text{min},n}}$$

gdje su:

- λ = faktor viška zraka ili pretičak zraka za izgaranje, $\lambda > 1$
- L = stvarna količina zraka koja sudjeluje u procesu izgaranja

Višak zraka za izgaranje izračunava se pomoću izraza: $(\lambda - 1) L_{\text{min}}$

Napomena: λ se kod ovog ispitivanja određuje na temelju analize sastava plinova izgaranja

5.3.5 Količina plinova izgaranja

Minimalna količina suhih plinova izgaranja, $\lambda = 1$:

$$V_{S,min} = V(\text{CO}_2) + V(\text{SO}_2) + V(\text{N}_2) , \quad \lambda = 1$$

$$V_{S,min,m} = 2,667 c + 1 s + 1 n + 0,768 L_{min} \quad \text{kg/kg}$$

$$V_{S,min,n} = 1,867 c + 0,7 s + 0,8 n + 0,79 L_{min} \quad \text{mn}^3/\text{kg}$$

Stvarna količina suhih plinova izgaranja:

$$V_{S,m} = V_{S,min,m} + (\lambda - 1) L_{min,m} \quad \text{kg/kg}$$

$$V_{S,n} = V_{S,min,n} + (\lambda - 1) L_{min,n} \quad \text{mn}^3/\text{kg}$$

Minimalna količina suhih plinova izgaranja kod selektivnog izgaranja:

$$V'_{S,min,n} = V_{S,min,n} + (O_{min} - O'_{min}) \quad \text{mn}^3/\text{kg}$$

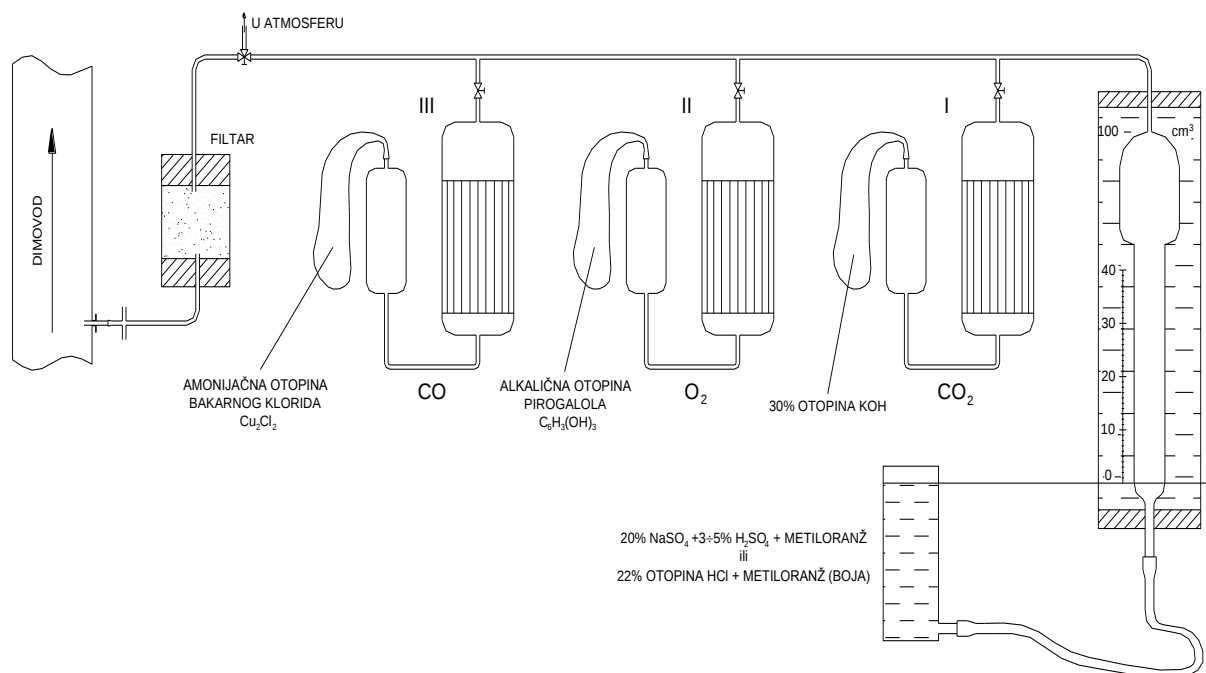
$$V'_{S,min,n} = 1,867 c + 0,7 s + 0,8 n + 0,79 L_{min} + (O_{min} - O'_{min}) \quad \text{mn}^3/\text{kg}$$

gdje je O'_{min} minimalna stehiometrijska količina kisika potrebna za selektivno izgaranje:

$$O'_{min} = 0,933 c + 5,6(h - o/8) + 0,7 s \quad \text{mn}^3/\text{kg}$$

5.3.6 Analiza plinova izgaranja, Orsatov aparat

ORSAT-ov APARAT



ORSATOV APARAT- Opis

- Služi za analizu plinova izgaranja
- Pomoću njega određuje se % udjela **CO₂**, **O₂** i **CO** u suhim plinovima izgaranja
- SASTAV:
 - 3 apsorpcione posude ispunjene sa staklenim kapilarama (cjevčicama), pojedinačno spojene sa posudama u kojima se nalazi tekućina za apsorpciju pojedinog plina (KOH za apsorpciju CO₂, Pyrogalol za apsorpciju O₂, amonijačna otopina bakrenog klorida za apsorpciju CO),
 - zajednički vod sa troputnim ventilom i filterom za spoj na dimovod kotla, a drugi kraj voda je spojen sa baždarenom biretom,
 - staklena posuda – spremnik (20% otop. natr. sulfata + 5% sump. kis.+voda), s gumenim crijevom
- Metoda mjerenja direktna - očitava se pojedinačni % udjela apsorbiranog plina u ukupnom usisanom volumenu (100 cm³) dimnih plinova.

Rezultati mjerenja udjela pojedinih plinova u plinovima izgaranja prikazani su u Tablici u Poglavlju 4.

5.3.7 Sastav plinova izgaranja, konstrukcija Ostwaldovog dijagrama (trokuta)

Volumenski udio pojedinih komponenata u plinovima izgaranja određuje se pomoću Orsatovog aparata (opis aparata u t. 5.3.6.).

Volumenski udio ugljičnog dioksida (CO₂) u suhim plinovima izgaranja definiran je s izrazom:

$$k_v = \frac{V_n(\text{CO}_2)}{V_{S,n}}$$

Volumenski udio kisika (O_2) u suhim plinovima izgaranja definiran je izrazom:

$$o_v = \frac{V_n(\text{O}_2)}{V_{S,n}}$$

Volumenski udio dušika (N_2) u suhim plinovima izgaranja definiran je izrazom:

$$n_v = \frac{V_n(\text{N}_2)}{V_{S,n}}$$

Volumenski udio ugljičnog monoksida (CO) u suhim plinovima izgaranja kod nepotpunog izgaranja definiran je izrazom:

$$k'_v = \frac{V'_n(\text{CO})}{V'_{S,n}}$$

gdje su:

$$V_{S,n} = V_n(\text{CO}_2) + V_n(\text{SO}_2) + V_n(\text{N}_2) + V_n(\text{O}_2) \quad \text{mn}^3/\text{kg}$$

količina suhih plinova izgaranja kod potpunog izgaranja, a

$$V'_{S,n} = V'_n(\text{CO}_2) + V'_n(\text{CO}) + V'_n(\text{SO}_2) + V'_n(\text{N}_2) + V'_n(\text{O}_2) \quad \text{mn}^3/\text{kg}$$

količina suhih plinova izgaranja kod nepotpunog izgaranja.

Iz izraza za $V_{S,n}$ dobivamo:

$$k_v + o_v + n_v = 1$$

Iz izraza za $V'_{S,n}$ dobivamo:

$$k'_v + k_v + o_v + n_v = 1$$

$$k_v = \frac{1,867 \cdot c}{V_{S,n}} \rightarrow k_{v,\max} = \frac{1,867 \cdot c}{V_{S,\min,n}}$$

$$\frac{k_{v,\max}}{k_v} = \frac{V_{S,n}}{V_{S,\min,n}}$$

Pomoću izraza za izračunavanje volumenskog udjela O_2 dobivamo:

$$o_v = \frac{V_n(O_2)}{V_{S,n}} = \frac{0,21(\lambda - 1)L_{\min,n}}{V_{S,n}} = \frac{0,21[V_{S,n} - V_{S,\min,n}]}{V_{S,n}} = 0,21 \left(1 - \frac{k_v}{k_{v,\max}} \right)$$

Ako se gornji izraz napiše u obliku:

$$\frac{o_v}{0,21} + \frac{k_v}{k_{v,\max}} = 1$$

dobivamo jednadžbu potpunog izgaranja u obliku koji je pogodan za geometrijski prikaz jer predstavlja jednadžbu pravca u segmentnom obliku.

Za $\lambda = 1$ $o_v = 0 \rightarrow k_v = k_{v,\max}$

Za $\lambda = \infty$ $o_v = 21\% \rightarrow k_v = 0$

Maksimalni udio CO kod selektivnog izgaranja:

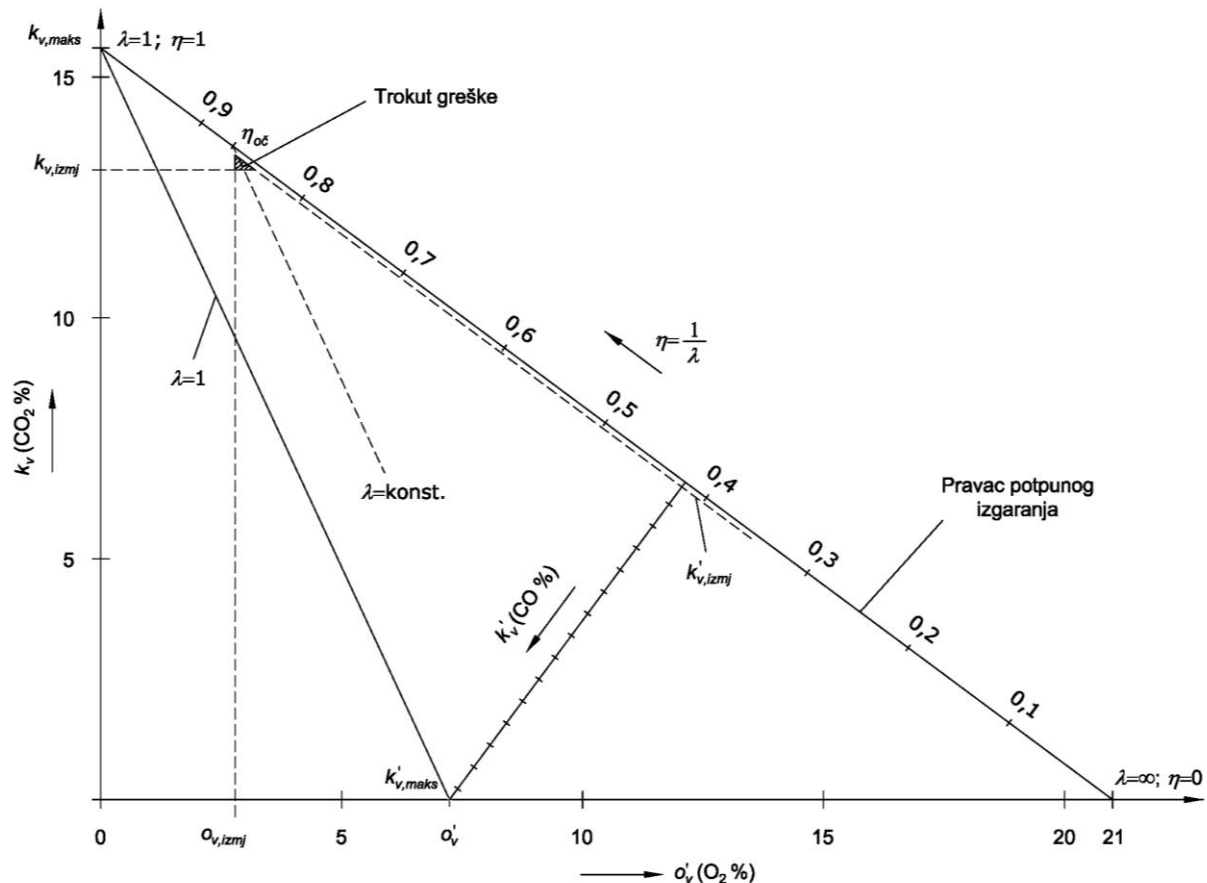
$$k'_{v,\max} = \frac{V'_n(CO)}{V'_{S,\min,n}} = \frac{1,867 \cdot c}{V'_{S,\min,n}}$$

Maksimalni udio O₂ u plinovima izgaranja kod selektivnog izgaranja:

$$o'_v = \frac{O_{\min,n} - O'_{\min,n}}{V'_{S,\min,n}}$$

OSTWALD-ov DIJAGRAM

Konstrukcija Ostwald-ovog dijagrama (trokuta) omogućava očitavanje faktora viška zraka λ na temelju izmjerenih vrijednosti udjela CO₂, CO i O₂.



5.3.8 Određivanje faktora viška zraka

5.3.8.1 Određivanje λ pomoću Ostwald-ovog trokuta

- Na milimetarskom papiru formata A4 konstruirati Ostwald-ov trokut prema podacima mjerenja i očitati vrijednost faktora viška zraka λ'

5.3.8.2 Približni proračun λ

$$\lambda'' = \frac{k_{V,\max}}{k_{V,sr.}}$$

$k_{V,SR}$ = srednja vrijednost udjela CO₂ u plinovima izgaranja

5.3.8.3 Proračunska metoda

$$\lambda''' = \frac{1}{1 - \frac{79}{21} \frac{o_v}{n_v}}$$

$$o_V = \text{udio kisika u plinovima izgaranja u \%}$$
$$n_V = 1 - o_V - k_V - k'_V, \text{ udio dušika u plinovima izgaranja u \%}$$

5.3.8.4 Srednja vrijednost faktora viška zraka

$$\lambda = \frac{\lambda' + \lambda''}{2}$$

5.3.9 Proračunavanje potrebne količine zraka i količine plinova izgaranja

- Potrebna količina zraka:

$$L_n = \lambda \cdot L_{\min, n} \quad \text{mn}^3/\text{kg}$$

- Stvarna količina suhih plinova izgaranja:

$$V_{S, n} = V_{S, \min, n} + (\lambda - 1) \cdot L_{\min, n} \quad \text{mn}^3/\text{kg}$$

- Stvarna količina vlažnih plinova izgaranja:

$$V_{vl, n} = V_{S, n} + V_{H_2O} = V_{S, n} + 1,3 \cdot (9h + w) \quad \text{mn}^3/\text{kg}$$

- Stvarni volumen vlažnih plinova:

$$V_{vl} = V_{vl, n} \frac{T_{izl}}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p_{izl}} \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$p_0 = 1,01 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$T_0 = 273 \text{ K}$$

$$P_{izl} \approx \text{barometarski tlak}$$

6. UČIN KOTLA

6.1 Parametri proizvedene pare

Tlak pare p_p :

$$P_p = P_k + P_0 \quad \text{kPa}$$

P_k = veličina tlaka izmjerena manometrom na izlazu pare iz kotla (vidi shemu postrojenja)

P_0 = atmosferski tlak

Iz dijagrama i tablice za suhozasićenu paru odrediti sljedeće veličine:

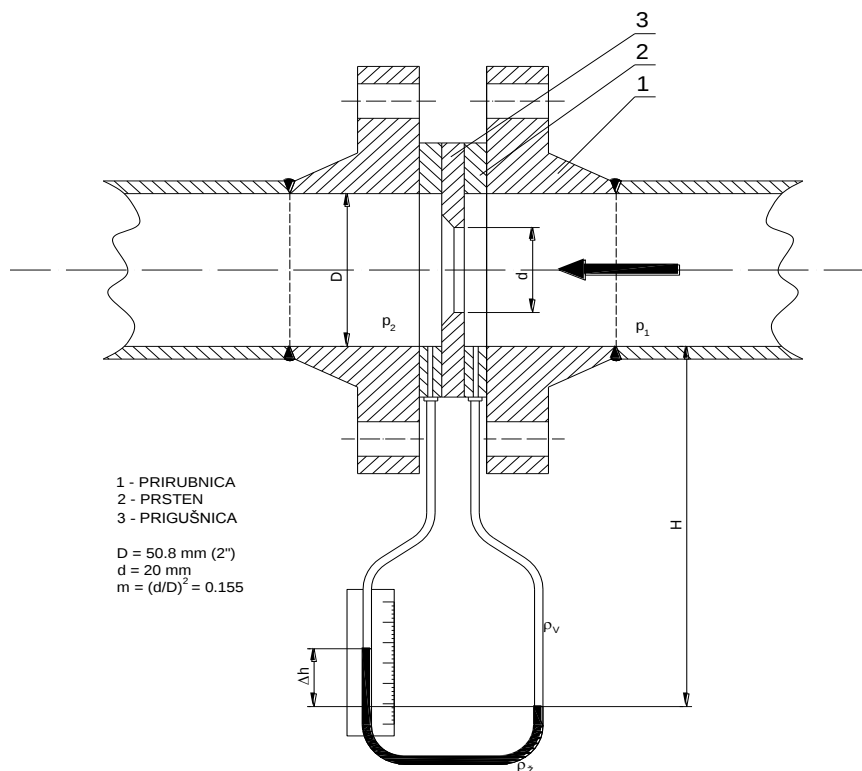
$$T_p = \dots\dots\dots \text{K}$$

$$\rho_p = \dots\dots\dots \text{kPa}$$

$$h_p'' = \dots\dots\dots \text{kJ/kg} \quad (\text{za } x = 0,99)$$

6.2 Određivanje količine pare pomoću mjerne prigušnice

MJERNA PRIGUŠNICA (DIN 1952)



- Maseni protok pare

$$\text{kg/s} \quad D_p = V \cdot \rho_p$$

V = volumenski protok m^3/s

$$V = \alpha \cdot \varepsilon \cdot A_{pr} \cdot w_{id} \quad \text{m}^3/\text{s}$$

$$\alpha = f(\mu, m, \xi, \text{Re}) = 0,623 (\text{iz tablice})$$

μ = faktor kontrakcije mlaza

$m = 0,155$ – odnos presjeka

ξ = faktor površinskog trenja

Re = Reynolds-ov broj

$$\varepsilon = 0,98 - \text{faktor ekspanzije} \rightarrow f\left(\kappa, \frac{p_2}{p_1}, m\right)$$

$$w_{id} = \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho_p}}$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \Delta h(\rho_z - \rho_v) \cdot g$$

$$\rho_z = 13546 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_v = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g = 9,807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

6.3 Korigirani učin kotla

$$D_{p,k} = \frac{D_p + w}{2} \cdot 1,01 \quad \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

w = potrošak napojne vode kg/s

$$D'_{p,k} = \frac{D'_p + w'}{2} \cdot 1,01 \quad \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

w' = potrošak napojne vode kg/h

D'_p = maseni protok pare kg/h

6.4 Učin kotla „normalne pare“

$$D_{p,n} = D'_{p,k} \cdot \frac{h''_p - h_w}{h''_{p,n} - h_{w,n}} \quad \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

7. PRORAČUN KORISNOSTI KOTLA

7.1 Direktna metoda

$$\eta_K = \frac{D'_{p,k} \cdot (h_p'' - h_w)}{B \cdot H_d}$$

$$\rho_G = \rho_{15^\circ} \cdot \frac{1}{1 + \beta(t_0 - 15)} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{gustoća goriva kod } t_0$$

7.2 Indirektna metoda

$$\eta_K = 1 - g_l - g_{ok} - g_{iz} - g_n - g_{od}$$

$g_l = 1\%$ gubici u ložištu

$g_{ok} = 6\%$ gubici na okolinu

$g_n = 1\%$ gubici zbog nestacionarnosti

$g_{od} = 0\%$ gubici zbog odmuljivanja

g_{iz} = gubici topline s plinovima izgaranja – potrebno ih je proračunati

$$g_{izl} \% = \frac{Q_{izl}}{H_d} \cdot 100\%$$

Q_{izl} = količina topline koja je sadržana u masi izlaznih plinova izgaranja kJ/kg

$$Q_{izl} = \sum Q_i$$

Q_i = količina topline koju sadrži pojedina komponenta smjese izlaznih plinova izgaranja

$$Q_{izl} = (2,667 \cdot c + s) \cdot \bar{c}_{P_{CO_2, SO_2}} \cdot \int_{T_0}^{T_{IZL}} \frac{1}{m_{CO_2}} \cdot (T_{IZL} - T_0) + (1 \cdot n + 0,768 L_{min.m} \cdot \lambda) \cdot \bar{c}_{P_{N_2}} \cdot \int_{T_0}^{T_{IZL}} \frac{1}{m_{N_2}} \cdot (T_{IZL} - T_0) +$$

$$+ 0,232(\lambda - 1) \cdot L_{min.m} \cdot \bar{c}_{P_{O_2}} \cdot \int_{T_0}^{T_{IZL}} \frac{1}{m_{O_2}} \cdot (T_{IZL} - T_0) + (9h + w) \cdot \bar{c}_{P_{H_2O}} \cdot \int_{T_0}^{T_{IZL}} \frac{1}{m_{H_2O}} \cdot (T_{IZL} - T_0) \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\bar{c}_p = \text{srednja vrijednost spec. topline} \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kmol, K}}$$

$$m_i = \text{molekularna masa} \quad \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

8. MOĆ ISPARAVANJA

$$X_P = \frac{D'_{p,k}}{B} \quad \frac{\text{kg pare}}{\text{kg goriva}}$$

- Neto moć isparavanja:

$$X_{P,N} = \frac{D_{p,n}}{B} \quad \frac{\text{kg pare}}{\text{kg goriva}}$$

9. OPTEREĆENJE OGRJEVNIH POVRŠINA

9.1 Apsolutno opterećenje ogrjevnih površina

$$q_{ogr} = \frac{D'_{p,k}}{A_{ISP}} \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

A_{ISP} = veličina ogrjevne površine m^2

9.2 Relativno opterećenje ogrjevnih površina

$$q_r = \frac{D_{p,n}}{D_N} \cdot 100\%$$

D_N = nominalni učin kotla kg/h

10. ZAKLJUČAK

LITERATURA

- 1 Mahović, S.: Teorija i tehnika mjerenja, Nastavni materijal, FSB Zagreb, 2006.
- 2 <http://www.fer.unizg.hr/predmet/teomje>, (pristup: 12. prosinac 2012.).
- 3 Tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1997.
- 4 [www.riteh.uniri.hr/.../5 brzina strujanja.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/.../5_brzina_strujanja.pdf), (pristup 04. listopad 2012.).