

INDUSTRIJSKI PARNI SISTEMI



OPIS SISTEMA

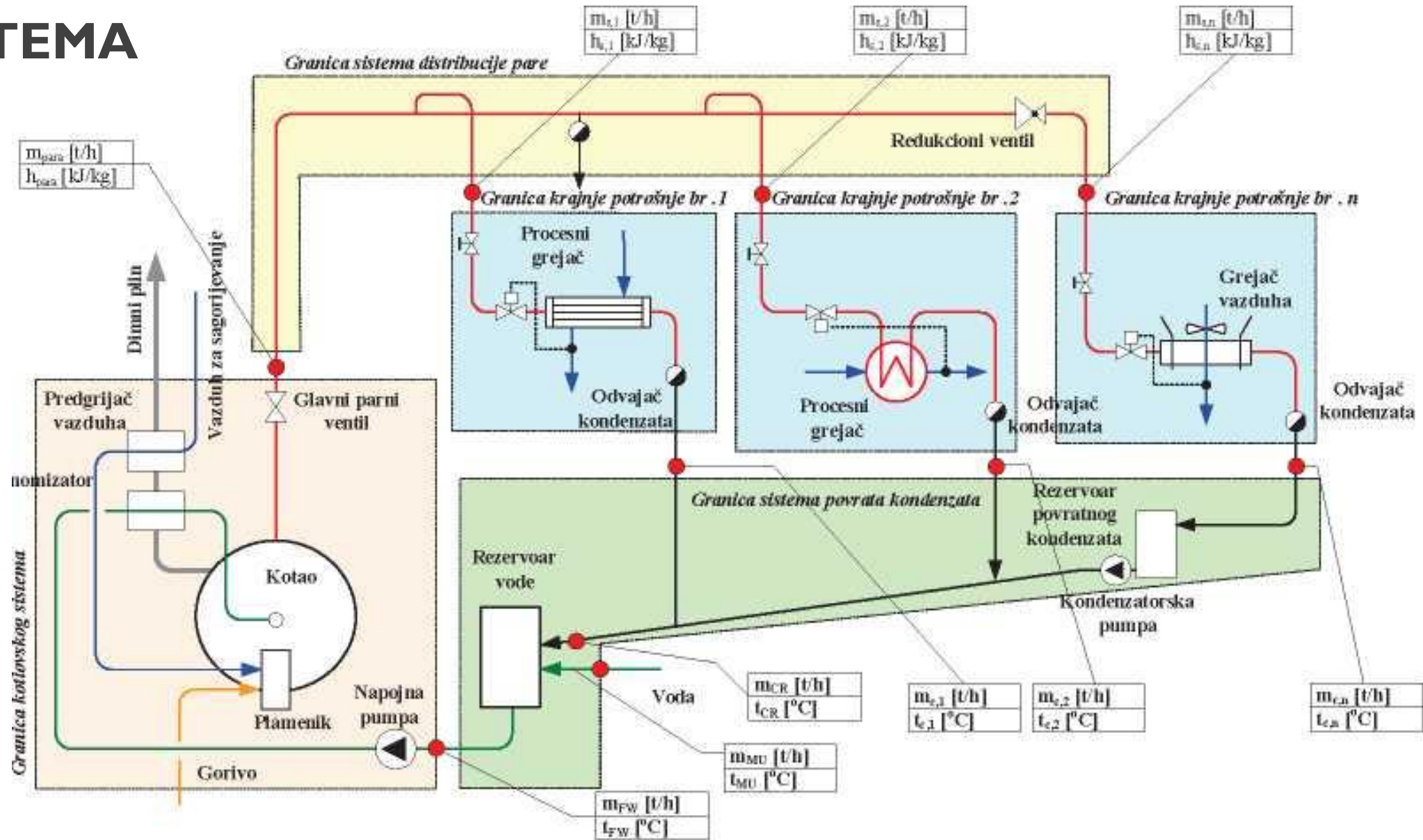
- Parni sistemi proizvode i distribuiraju toplotnu energiju u obliku pare koja se potom koristi za razne namene u proizvodnim procesima. U proseku se preko 40% ukupnog goriva potrošenog u industriji koristi za proizvodnju pare. Parom se zagrijavaju sirovine i tretiraju poluzavršeni proizvodi. Para je izvor energije za opremu, ali i izvor toplote i medijum za proizvodnju električne energije.

OPIS SISTEMA

Tipični parni sistem sastoji se od sljedećih podsistema:

- kotlova
- sistema distribucije pare (što uključuje regulacione ventile, odvajače kondenzata, izolaciju itd)
- krajnjih potrošača pare (što uključuje sistem regulacije, odvajače kondenzata, izolaciju itd)
- sistema povrata kondenzata (što uključuje cevi, spremnike, izolaciju, pumpe itd)
- sistem merenja, praćenja i upravljanja.

OPIS SISTEMA



KOTLOVI

Kotao je uređaj koji pretvara hemijsku energiju goriva u korisnu toplotnu energiju. Na izlazu kotla tipično je para (suvozasícena ili pregrejana), vrela voda ili toplotni fluid poput mineralnog ulja.

Postoji više različitih vrsta kotlova, a mogu se podeliti u dve osnovne grupe:

- **kotlovi s vodenim cevima**, u kojima se voda nalazi u cevima, a plamen i vrući produkti sagorevanja prolaze oko njih
- **plamenocevni ili oklopljeni kotlovi**, u kojima produkti sagorevanja prolaze kroz plamenu cev i nakon toga ulaze u sistem cevi uronjen u vodu unutar oklopa.

Većina kotlova u industriji koristi se za proizvodnju suvozasícene pare niskog i srednjeg pritiska. Pri pravilnom pogonu, svi tipovi modernih kotlova su više ili manje jednako efikasni u pretvaranju goriva u paru, vrelu vodu ili vruće ulje.

Tip kotla	Efikasnost, [%]
Kondenzirajući	88 - 92
Visokoefikasni modularni	80 - 82
Oklopljeni kotao - vrela voda	78 - 80
Oklopljeni kotao - para	75 - 77
Povratni plamen	72 - 75
Liveno željezo, sekcionirano	68 - 71
Parogenerator	75 - 78
Vodena cev s ekonomizatorom	75 - 78

SISTEM DISTRIBUCIJE PARE

- Sustav distribucije pare je podsistem koji isporučuje proizvedenu paru krajnjim potrošačima. Parametri pare zavise o potrebama krajnjih korisnika. Kondenzacija pare događa se zbog neizbežnog hlađenja pare u cevima, a kondenzat treba uklanjati iz cevovoda na za to predviđenim tačkama.
- U tu svrhu koriste se odvajači kondenzata, ne samo u sistemu distribucije pare, nego i kod krajnjih korisnika. Tipovi i karakteristike odvajača kondenzata mogu se pronaći u literaturi ili dobiti direktno od proizvođača.
- Izolacija sistema distribucije pare je vrlo važna za dobre radne karakteristike tog podsistema i za veliku efikasnost celokupnog parnog sistema.

KRAJNI POTROŠAČI

- Mnogo je krajnjih korisnika pare u industriji. a svaki od njih predmet je upravljanja energijom praćenjem i procenjivanjem individualne energetske efikasnosti.
- Nećemo ulaziti u detaljnu analizu raznih krajnjih potrošača, ali za pravilni pogon bilo kojeg krajnjeg potrošača, potrebno je isporučiti potrebnu paru pri odgovarajućem pritisku.
- Taj parametar određuje proizvođač uređaja koji troši paru. Ključno pitanje u efikasnom upravljanju bilo kojeg krajnjeg potrošača je pridržavanje uputstva proizvođača i korištenje na projektovanom kapacitetu i definisanje i provođenje pravilnog plana održavanja.

SISTEM POVRATA KONDENZATA

- Jedna od najstarijih mera za povećanje energetske efikasnosti u industrijskim parnim sistemima je korišćenje povrata kondenzata.
- U prošlosti ta mera nije privlačila puno pažnje s obzirom na to da je energija bila relativno jeftina, a sistem povrata kondenzata srazmerno skup.
- U nekim procesima, para se direktno koristi u procesu pa nije moguće razmatrati povrat kondenzata. Isti slučaj važi i kada para može biti onečišćena opasnim supstancama iz procesa i kada, zbog sigurnosti, kondenzat mora biti uklonjen. Međutim, čak i u takvim slučajevima moguće je i poželjno iskoristiti energiju kondenzata pomoću razmenjivača toplote.

DEFINICIJA EFIKASNOST SISTEMA

- **Ukupna energetska efikasnost sistema** definiše se kao odnos isporučene i iskorišćene energije svim krajnjim korisnicima i energije isporučene gorivom u kotao.
- Energetska efikasnost definisana na taj način, zapravo je pokazatelj energetske efikasnosti posmatranog parnog sistema.
- Energija isporučena krajnjim korisnicima može se definirati kako sledi:

$$E_{KK} = \sum_{n=1}^N (m_{p,n} \cdot h_{p,n} - m_{k,n} \cdot 4,21 \cdot t_{k,n}) \quad (n = 1, 2, 3 \dots N)$$

DEFINICIJA UČINKA SISTEMA

- *Za Kotao*
- *Za Sistem distribucije pare*
- *Za sistem povrata kondenzata*

$$\eta_K = \frac{m_{\text{para}} \cdot (h_{\text{para}} - c_k \cdot t_{k,n})}{M_{\text{GORIVO}} \cdot GOV}$$

$$\eta_{PK} = \frac{m_{PK} \cdot c_k \cdot t_{PK}}{m_{ZV} \cdot c_k \cdot t_{ZV} + \sum_{N=1}^N (m_{k,n} \cdot c_k \cdot t_{k,n})}$$

$$\eta_{DP} = \frac{\sum_{N=1}^N (m_{p,n} \cdot h_{p,n})}{m_{\text{para}} \cdot h_{\text{para}}}$$

$$\eta_{PS} = \frac{\sum_{N=1}^N (m_{p,n} \cdot h_{p,n} - m_{k,n} \cdot c_k \cdot t_{k,n})}{M_{\text{GORIVO}} \cdot GOV}$$

CENA PARE

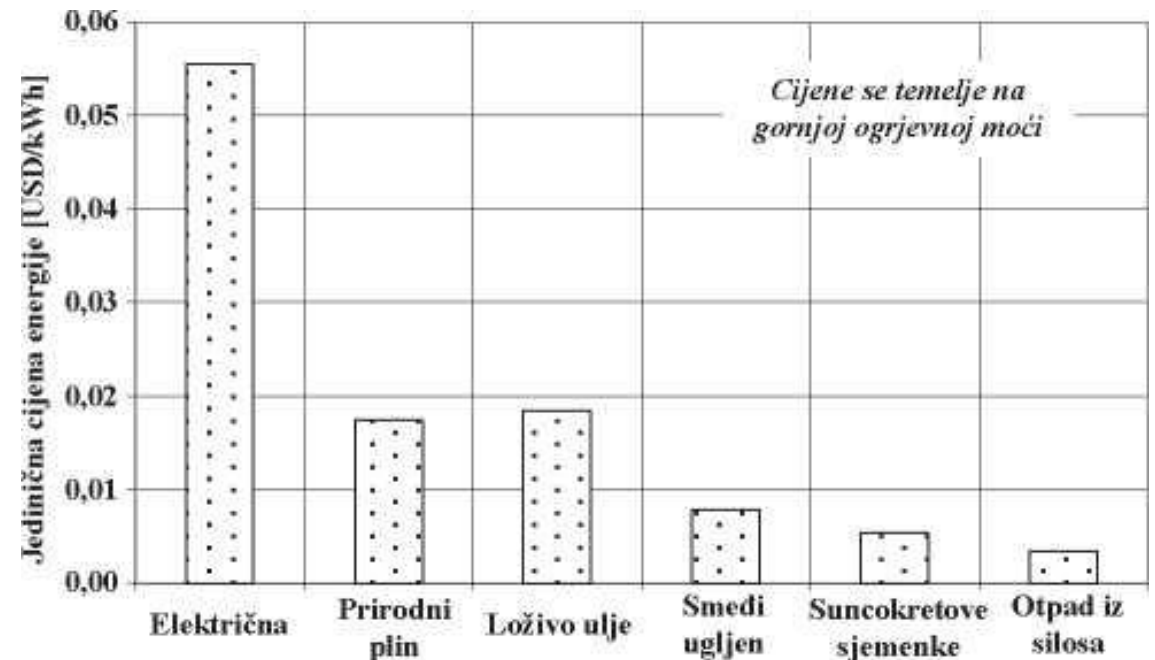
- Zahteva se određivanje troškova i korisnosti (ušteda) predloženih promena. Glavni faktor u procenjivanju su cena goriva i cena onoga što se gorivom proizvodi. Cena 1 t pare je važan pokazatelj efikasnosti parnog sistema. Najbolji način da se to odredi je kontinuirano merenje proizvodnje pare i potrošnje goriva. Ako su ti podaci dostupni, cena po toni pare je:

$$CP = \frac{M_G(\tau) \cdot JC}{m_p(\tau)}$$

Prirodni plin		
Donja toplotna moć (DOV)	MJ/m ³ normnom	35,71
Gornja toplotna moć (GOV)	MJ/m ³ normnom	39,74
Gustina (15 °C; 1,013 bar)	kg/m	0,692
Jedinična cena	USD/m ³ normnom	0,1923
Jedinična cena (temeljem GOV-a)	USD/(kWh)	0,0174
Teško loživo ulje		
Donja toplotna moć (DOV)	MJ/kg	40,03
Gornja toplotna moć (GOV)	MJ/kg	42,59
Gustina (15 °C; 1,013 bar)	kg/l	0,95
Jedinična cena	USD/l	0,2076
Jedinična cena (temeljem GOV-a)	USD/(kWh)	0,0185
Mrki ugljen (sušeni)		
Donja toplotna moć (DOV)	MJ/kg	31,20
Gornja toplotna moć (GOV)	MJ/kg	32,11
Gustoća (15 °C; 1,013 bar)	kg/m	-
Jedinična cena	USD/kg	0,0698
Jedinična cena (temeljem GOV-a)	USD/(kWh)	0,0078
Semenke suncokreta		
Donja toplotna moć (DOV)	MJ/kg	15,91
Gornja toplotna moć (GOV)	MJ/kg	16,93
Gustoća (15 °C; 1,013 bar)	kg/m ³	-
Jedinična cena	USD/kg	0,0252
Jedinična cena (temeljem GOV-a)	USD/(kWh)	0,0054
Otpad iz silosa		
Donja toplotna moć (DOV)	MJ/kg	10,00
Gornja toplotna moć (GOV)	MJ/kg	10,64
Gustoća (15 °C; 1,013 bar)	kg/m ³	-
Jedinična cena	USD /kg	0,0100
Jedinična cena (temeljem GOV-a)	USD/(kWh)	0,0034

CENA PARE

- Troškovi električne energije u kotlarnici su niski u odnosu na trošak goriva, a većinom ih stvaraju ventilatori i pumpe. Dodatno, troškovi tretiranja napojne vode u kotlovima takođe doprinose troškovima pare. Proračun jedinične cene energije raznih goriva prikazaćemo na primeru fabrike biljnih ulja. Cene goriva proračunate su na osnovu mesečnih računa i ukupne izmerene mesečne potrošnje.
- Godišnja potrošnja primarne toplotne energije u fabrici u prikazanom primeru je 147,348 MWh. Većina te energije se koristi za godišnju proizvodnju pare od 63.206 t. Dodatne male količine prirodnog gasa (samo 2,6%) koriste se za mašine za sušenje. Koristeći ranije spomenute jedinične cene i poznate udele pojedinih prenosnika energije u proizvodnji pare, ukupna cena energije za proizvodnju pare je 1.906.566 USD. Efikasnost energetske transformacije je implicitno ugrađena u proizvedenu paru. Održavanje, rad i drugi vezani troškovi proizvodnje pare nisu uključeni u taj iznos.

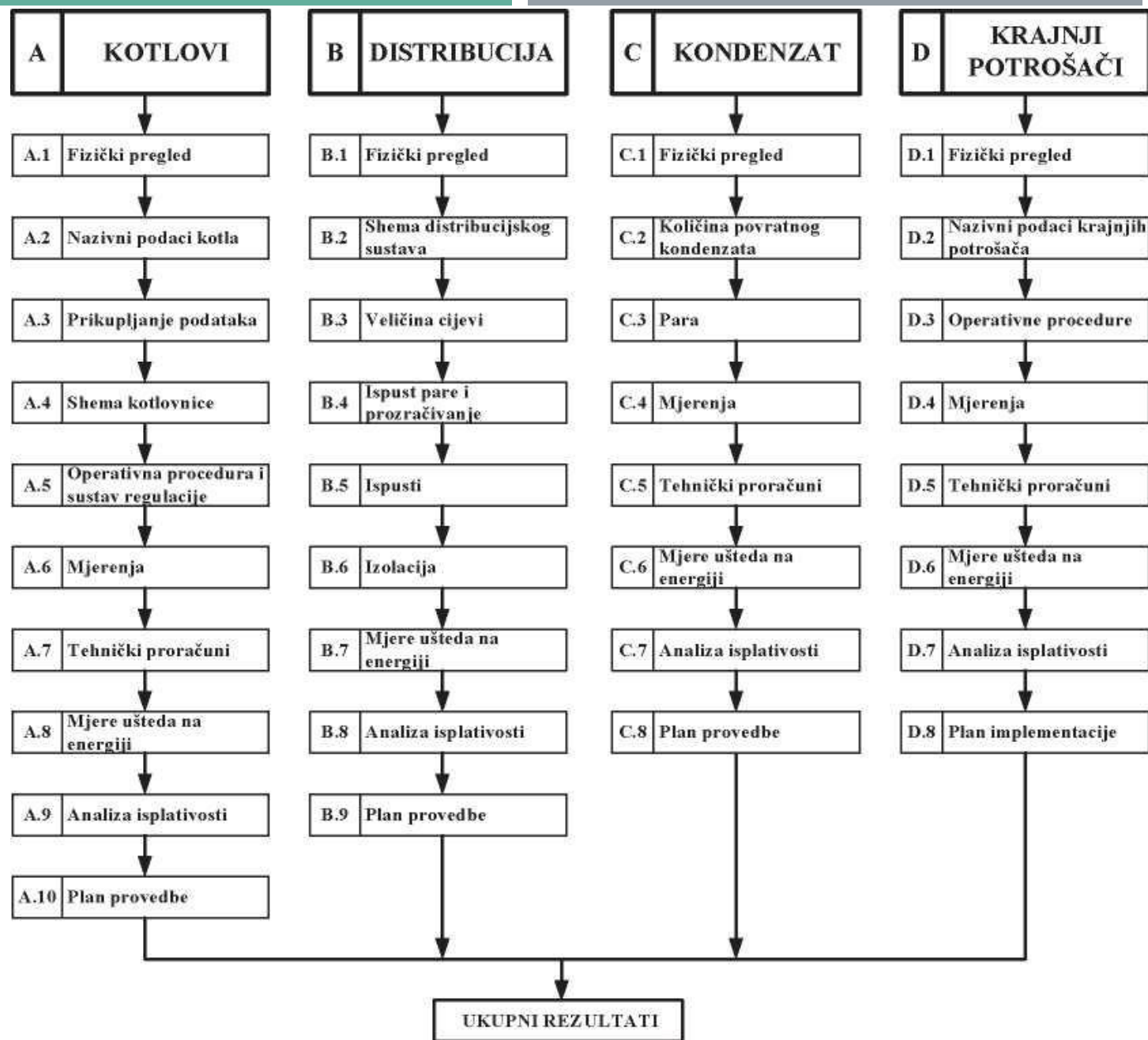


NAČELA ANALIZE EFIKASNOSTI

Predlažemo sljedeće korake u analizi parnog sistema.

- **Korak 1:** određivanje ili procena troškova goriva i drugih troškova vezanih za pogon parnog sistema i analiza organizacije proizvodnog procesa prema potrošnji pare.
- **Korak 2:** Istraživanje pogona kotla. Analiza mora biti usredsređena na procenjivanje efikasnosti pretvaranja goriva u paru u kotlu. Mora se bazirati na postojećim podacima iz dnevnih pogonskih zapisnika i provedenih dodatnih merenja pogona kotla.
- **Korak 3:** Merenje, proračun ili procena potrošnje pare krajnjih korisnika i istraživanje pogonske prakse svakog krajnjeg korisnika.
- **Korak 4:** Istraživanje energetske gubitaka u distribucionom sistemu.
- **Korak 5:** Istraživanje povrata kondenzata.

NAČELA ANALIZE UČINKA



MOGUĆNOSTI ZA POBOLJŠANJE EFIKASNOSTI

	Tehnika ili metoda	Opis	Mogućnost poboljšanja energetske efikasnosti važne za trenutnu potrošnju
1.	Pogonski postupci i održavanje kotlova	Kada se koristi više od jednog kotla u pogonu, treba se analizirati redosled upravljanja. Održavanje mora biti potpuno usklađeno s preporukama proizvođača opreme. Optimiziranje brzine odzračivanja će smanjiti gubitak pare. Sistemi za praćenje trebaju pokriti sve relevantne pokazatelje učinka (brzine protoka goriva i pare, profil opterećenja svakog kotla, pritisak pare, kvaliteta vode itd).	< 5%
2.	Tretiranje vode i kondicioniranje vode u kotlu	Smanjivanje ukupne količine otopljenih čvrstih tvari u vodi kotla omogućava manje odmuljivanje i stoga manje gubitke energije.	< 2%
3.	Upravljanje svim otopljenim materijama i odmuljivanjem	Poželjno je automatsko upravljanje koje dugoročno može zaštititi kotao.	< 2%
4.	Rekuperacija toplote odmuljivanja	Prenos dostupne toplotne energije u toku odmuljivanja natrag u sistem smanjuje energetske gubitke.	< 4%
5.	Rekuperacija otparača	Rekuperacija dostupne niskopritisne pare za predgrevanje napojne vode.	< 2%
6.	Sistemi upravljanja kotlom i plamenikom, digitalna regulacija izgaranja	Ta mera je od posebne važnosti za kotlove koji funkcioniraju s promenjivim opterećenjem. Primena te mere je često direktno vezana za sledeću meru.	< 5%
7.	Motori s promenjivom brzinom za ventilatore plamenika	Ta tehnika može smanjiti potrošnju električne energije kotla.	-
8.	Ekonomizatori	Rekuperacija toplote izlaznih plinova i povratni prijenos natrag u sistem predgrevanjem napojne vode.	< 5%
9.	Predgrevanje vazduha za sagorevanje	Rekuperacija toplote iz izlaznih gasova i povratni prenos nazad u sistem predgrevanjem vazduha za sagorevanje. Ta mera može biti primenjena zajedno s prethodnom.	< 2%
10.	Poboljšanja sistema distribucije vodene pare	Cevi, ventili, spojnice i posude parnog sistema moraju biti dobro izolovani. Potrebno je: <ul style="list-style-type: none"> • provesti efikasan program održavanja ventila • izolovati paru od nekorištenih linija • popraviti mesta ispuštanja pare • smanjiti ventilisanu paru. 	< 10%
11.	Povećanje povrata kondenzata	Rekuperacija toplotne energije u kondenzatu i smanjivanje količine zamenske vode koja se dodaje u sistem štedi na energiji i hemikalijama za tretiranje vode. Može se koristiti visokopritisni kondenzat da bi se proizvela niskopritisna para i na taj način se može rekuperirati i energija u povratnom kondenzatu.	< 10%
12.	Pritisak pare	Nameštanje pritiska pare s minimalnim potrebama krajnjih potrošača.	< 2%

PRIMER: ANALIZA ENERGETSKOG UČINKA PARNOG SISTEMA

- Razmotrimo sledeći stvarni primer. Grupa krajnjih potrošača troši ukupno 5,34 t/h ili 1,48 kg/s suvozasicne pare pod pritiskom 6,2 bar. Srednja temperatura kondenzata nakon završenog proizvodnog procesa je 85 °C. Sve moći su merene u sklopu programa merenja. Procenjuje se da je ukupan gubitak pare svih krajnjih potrošača oko 10%. S tim zadatim moćima možemo izračunati ukupni utrošak toplote kako sledi:

$$E_{UK} = m_{p,UK} \cdot h_{para} - m_{k,UK} \cdot 4,21 \cdot t_{k,UK} = 3.631,01 \text{ [kJ/s ili kW]} .$$

- To je stvarna potrošnja energije, koja u kombinaciji s obimom proizvodnje čini pokazatelj koji je osnova za praćenje efikasnosti.

PRIMER: ANALIZA ENERGETSKOG UČINKA PARNOG SISTEMA

- U promatranom primeru koristi se teško loži ulje (engl. *HFO - Heavy Fuel Oil*), a ukupna potrošnja u istom vremenu i izračunata potrošnja toplote je 0,1145 kg/s. Gornja toplotna moć teškog loživog ulja je 42,0 MJ/kg. Sada sledi:

$$\eta_{PS} = \frac{3.613,01}{0,1145 \cdot 42.000} = 0,7513 = 75,13\%.$$

- Ti rezultati pokazuju da je od ukupne dostupne primarne energije goriva 75,13% pretvoreno u toplotnu energiju kako bi se proveo proizvodni proces. Preostali deo do 100%, odnosno 24,87%, su gubici. Upravo taj deo energije predmet je upravljanja energijom.
- Efikasnost iskorištavanja energije u kotlu u prikazanom primeru određena je nezavisnim testom kojim je određeno da iznosi 82,93%. Koristeći tu moć možemo odrediti proizvedenu suvozasicnu paru na izlazu iz kotla:
- Temperatura napojne vode (47,21 °C) definisana je jednačinom koja sledi.

$$m_{para} = \frac{\eta_B \cdot M_{GORIVO} \cdot GOV}{h_{para} - 4,21 \cdot t_{pv}} = \frac{0,8293 \cdot 0,1145 \cdot 42.000}{2.759,2 - 4,21 \cdot 47,21} \cdot \frac{3.600}{1.000} = 5,61 \text{ [t/h]} .$$

PRIMER: ANALIZA ENERGETSKOG UČINKA PARNOG SISTEMA

- Imajući taj podatak u vidu, moguće je odrediti efikasnost sistema distribucije pare:

$$\eta_{DP} = \frac{3.613,01}{5,61 \cdot \frac{1.000}{3.600} \cdot 2.757,8} = 0,9519 = 95,19\%$$

- Ako se protok napojne vode ne meri direktno, može se proceniti na bazi poznatog toka ili odmuljivanja i bazi procenjenih gubitaka sistema distribucije pare. Ti maseni (i toplotni) gubici se obično izražavaju u postocima proizvedene suvozasicne pare (m_{para}). U prikazanom slučaju se te moći procenjuju na osnovu pregleda instalacija i određivanja kvaliteta vode. Stoga, procenjeno je sljedeće:
 - $x = 5\%$ - udeo napojne vode koji se gubi kao odmuljivanje
 - $y = 5\%$ - udeo ukupne pare koji se gubi zbog ispusta i neispravnih odvajača kondenzata u sistemu distribucije pare.

$$m_{pv} = (1 + x + y) \cdot m_{para} = \left(1 + \frac{5}{100} + \frac{5}{100}\right) \cdot 5,61 = 6,17 \text{ [t/h]} .$$

PRIMER: ANALIZA ENERGETSKOG UČINKA PARNOG SISTEMA

- Nakon prolaska kroz krajnje korisnike, para kondenzira i ulazi u podsistem povrata kondenzata.
- Merenjem temperature kondenzata na ulazu u podsistem u primeru izmereno je 82 °C. Protok kondenzata je 4,81 t/h (= 0,1 · 5,34), ali oko 50% tog kondenzata se ne vraća jer su krajnji potrošači daleko od kotlarnice, čime je objašnjeno zašto se kondenzat jednostavno ispušta u kanalizaciju.
- Znajući da je temperatura zamenske vode 25 °C, efikasnost podsistema povrata kondenzata je:

$$\eta_{CR} = \frac{0,5 \cdot 4,81 \cdot 4,21 \cdot 82}{3,76 \cdot 4,21 \cdot 25 + 4,81 \cdot 4,21 \cdot 85} = 0,392 = 32,2\%.$$

PRIMER: ANALIZA ENERGETSKOG UČINKA PARNOG SISTEMA

- Mala efikasnost tog podsistema je izravna posljedica velikih količina kondenzata koji se odbacuje. Zato je potrebna opskrba zamenskom vodom relativno niske temperature također velika.
- Temperatura zamenske vode se određuje na bazi jednostavne energetske bilance toka ulazne i izlazne napojne vode. Može se izvesti sljedeća jednadžba:

$$t_{FW} = \frac{m_{CR}}{m_{FW}} \cdot t_{CR} + \left(1 - \frac{m_{CR}}{m_{FW}}\right) \cdot t_{MU} = \frac{2,4}{6,17} \cdot 82 + \left(1 + \frac{2,4}{6,17}\right) \cdot 25 = 47,21 \text{ [}^\circ\text{C]} .$$

- Ponovljeni proračun za promijenjene parametre (kolona 5) prikazuje povećani stupanj efikasnosti parnog sistema, sa 75,13% na 81,29%, što znači da relativno jednostavne mere mogu znatno poboljšati radne parametre parnog sistema i njegovu ukupnu energetska efikasnost.

PRIMER: ANALIZA ENERGETSKOG UČINKA PARNOG SISTEMA

- Sada su određeni svi pokazatelji energetske učinka za odvojene sisteme prikazane na Slici i zajednički pokazatelj energetske učinka celog parnog sistema.
- Tablica pruža celovit proračun tih pokazatelja u koloni 4. Vrednosti od 1. do 7. su parametri koji utiču na učinak i koji bi se trebali i morali kontrolisati. Vrednosti 8. do 11. i u 15. su konstantne za prikazani primer.
- Stupac 5. prikazuje proračun poboljšanih pogonskih parametara sistema. Gubitak pare i kondenzata je smanjen kod krajnjih korisnika sa 10% na 5% popravljanjem nekih ispusta pare i nekoliko odvajača kondenzata koji su bili neispravni i koji su ispuštali paru. Izolovanjem nekoliko neizolovanih delova moguće je povišati temperaturu kondenzata sa 82 na 83 °C. Postotak povratnog kondenzata može se povećati sa sadašnjih 50% na 75%. Efikasnost kotla može se povećati s 82,93% na 86% nameštanjem sadržaja O₂ i čišćenjem površina za izmenu toplote. Kvalitet vode u kotlu nije zadovoljavajuć i stvorilo je onečišćenja na površinama za izmenu toplote na strani vode. Poboljšanje kvaliteta zamenske vode ukloniće posledice gubitaka na strani vode i takođe će smanjiti odmuljivanje vode sa 5% na 3%. Jednako važi i u slučaju gubitka pare i kondenzata, kada su uočeni slični pogonski nedostaci podsistema distribucije pare. Procjena je da će se jednostavnim mjerama doći do smanjenja gubitka pare s 5% na 3%.
- Ponovljeni proračun za promijenjene parametre (stupac 5) prikazuje povećani stupanj efikasnosti parnog sistema, sa 75,13% na 81,29%, što znači da relativno jednostavne mjere mogu znatno poboljšati radne značajke parnog sistema i njegovu ukupnu energetske efikasnost.

	Opis	Jedinica	SADA	NOVO
	2	3	4	5
Utjecajni čimbenici				
1	Gubitak pare i kondenzata kod krajnjih potrošača	%	10	5
2	k'.EU	°C	85	85
3	^CR < ?C£U	°C	82	83
4	Postotak povrata kondenzata	%	50	75
5	nKotao (zadano)	%	82,93	86
6	X (odmuljivanje)	%	5	3
7	Y (gubitak pare u distribucijskom sistemu)	%	5	3
KRAJNI POTROŠAČI				
8		t/h	5,34	5,34
9		bar	6,20	6,20
10		°C	160,14	160,14
11		kJ/kg	2.757,80	2.757,80
12		t/h	4,81	5,07
13		kJ/s	3.613,01	3.586,47
ZAMJENSKA VODA				
14		°C	25	25
KOTAO				
15	GOV	MJ/kg	43,9	43,9
16	•Mgorivo	kg/s	0,1145	0,1054
17	Ppara	bar	6,4	6,4
18		°C	161,39	161,39
19		kJ/kg	2.759,2	2.759,2
20	mpara	t/h	5,58	5,50
POVRAT KONDENZATA				
21	mm	t/h	6,17	5,83
22	mm	t/h	2,40	3,80
23	mMU	t/h	3,76	2,03
24	tpv	°C	47,71	62,,85
25	nPK	%	39,20	62,85
DISTRIBUCIJA PARE				
26	DP	%	95,19	97,04
PARNI SUSTAV				