

Univerzitet u Beogradu
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Vladimir Z. Stijepović

**NOVA METODA ZA ENERGETSKU INTEGRACIJU
PROCESNIH POSTROJENJA U INDUSTRIJSKIM
KOMPLEKSIMA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2014

MENTOR

Mirjana Kijevčanin, Redovni profesor
na Tehnološko-Metalurškom fakultetu

ČLANOVI KOMISIJE

Slobodan Šerbanović, Redovni profesor
na Tehnološko-Metalurškom fakultetu

Aleksandar Grujić, viši naučni saradnik
na Institut za hemiju, tehnologiju i
metalurgiju

DATUM ODBRANE

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Teorijski deo	4
2.1 Značaj upotrebe kombinovanog procesa za proizvodnju toplote i električne energije u svetskoj industriji	4
2.2 Metode za energetske integracije procesa	12
2.3 Termodinamičke metode za projektovanje mreže razmenjivača toplote	14
2.3.1 Određivanje minimalnih potreba za hlađenjem i grejanjem u procesu	14
2.3.2 Određivanje operativnih troškova	17
2.3.3 Određivanje minimalnih kapitalnih troškova mreže razmenjivača toplote	20
2.3.4 Određivanje optimalne vrednosti minimalne razlike temperature	25
2.3.5 Projektovanje mreže razmenjivača toplote	25
2.4 Matematičke metode za energetske integracije procesa	31
2.4.1 Sekvencijalno projektovanje mreže razmenjivača toplote	31
2.4.2 Simultano projektovanje mreže razmenjivača toplote	43
2.4.3 Poređenje sekvencijalnog i simultanog pristupa za projektovanje mreže razmenjivača toplote	43
2.5 Metode za energetske integracije postrojenja	44
2.6 Optimizacioni algoritmi	50
3. Razvoj metode za energetske integracije postrojenja u industrijskim kompleksima	54
3.1 Definisanje problema	55
3.2 Razvoj metode	59
3.2.1 Prikupljanje i obrada podataka iz industrijskog kompleksa	60
3.2.2 Određivanje potencijala za uštedu energije	63
3.2.3 Izvodljive integracione opcije za upotrebu viška toplote	68
3.2.4 Određivanje maksimalnog iskorišćenja otpadne toplote	70
3.2.5 Projektovanje integracionog sistema upotrebom viška toplote i kogeneracijom	74
4. Primena metode na studiju slučaja	76
4.1 Prikupljanje i obrada podataka	76
4.1.1 Operativni podaci sistema toplih pomoćnih struja	77
4.1.2 Operativni podaci za hladne pomoćne struje i procesne struje u kojima se uklanja višak toplote	78
4.1.3 Podaci za turbine	79
4.2 Određivanje potencijala za uštedu energije	86
4.3 Uspostavljanje veze između postrojenja	91
4.4 Određivanje maksimalnog iskorišćenja otpadne toplote	93
4.5 Projektovanje mreže za integraciju industrijskog kompleksa	100
5. Zaključak	110
Reference	112
Lista slika	124
Lista tabela	127
Lista oznaka	129

1. Uvod

Konstantan porast ukupne svetske industrijske proizvodnje iz godine u godinu zahteva sve veću potražnju za energentima. Fosilna goriva su još uvek primarni izvor toplotne energije i koriste se za proizvodnju električne energije upotrebom Brajtonovog i/ili Rankinovog ciklusa, ali se sve češće zamenjuju obnovljivim sirovinama i izvorima energije.

Visoke cene fosilnih goriva, kao i predviđanja rasta cena, posledica su ograničenih prirodnih resursa, koji se veoma brzo iscrpljuju i nestaju zbog sve veće potražnje. Treba napomenuti da je sa tehnološkog aspekta eksploatacija fosilnih goriva sve zahtevnija i skuplja. Sa gledišta ekonomske analize, visoke cene fosilnih goriva odražavaju se na povećanje cene krajnjeg proizvoda, što vodi ka smanjenju konkurentnosti ekonomija koje nemaju sopstvene izvore već zavise od uvoza. Pored ekonomskog uticaja, porast potrošnje fosilnih goriva dovodi do sve veće emisije dimnih gasova koji direktno utiču na životnu sredinu, a to se najviše ogleda kroz kvalitet vazduha. U cilju smanjenja emisije gasovitih supstanci koje stvaraju efekat staklene bašte, Ujedinjene Nacije pokrenule su inicijativu predlaganjem okvirne konvencije o klimatskim promenama, poznatijom kao Kjoto protokol. Kroz mehanizme definisane u protokolu zemlje potpisnice se obavezuju na smanjenje emisija gasova. Republika Srbija je prihvatila Kjoto protokol 2007. godine. Pored Kjoto protokola, zemlje Evropske unije usvojile su i akt o energetske - klimatskim pravcima koji je predložila evropska komisija 2007. godine. Navedenim aktom se predviđa smanjenje ukupne potrošnje energije za 20% u odnosu na predviđanja za 2020. godinu, porast udela bio-goriva u ukupnoj potrošnji goriva na 20%, i smanjenje emisije dimnih gasova za 20% u odnosu na nivo emisija 1990. godine. Navedeni akt predviđa i uvođenje takse na emisiju ugljen-dikoksida. Na osnovu predhodnih razmatranja može se konstatovati da će efikasnije korišćenje energije imati sve veći ekonomski uticaj na privredne subjekte. Način na koji će se privredni subjekti prilagoditi regulativama vezanim za klimatske promene u velikoj meri će uticati na održivost, a samim tim i na profitabilnost njihove proizvodnje.

Postoje dva smera za poboljšanje energetske efiksanosti industrijskih postrojenja: a) smanjenje potrošnje energenata u samom proizvodnom procesu, b) energetska integracija industrijskih

postrojenja. Smanjenja potrošnje energenata u procesu zahteva razvoj postojećih i uvođenje novih, energetske manje zahtevnih tehnologija. Energetska integracija industrijskih postrojenja zahteva formiranje međusobnih veza koje bi omogućile razmenu energije. Uspostavljanje ovakve vrste veza zahteva metodološki pristup, s obzirom na veliki broj fizičkih i ekonomskih ograničenja koja se nameću u ovakvim složenim sistemima.

Toplotna integracija pojedinačnih procesa se već nekoliko decenija uspešno primenjuje za povećanje energetske efikasnosti. Danas se smatra standardnom tehnikom pri projektovanju novih i preuređivanju postojećih mreža razmenjivača toplote. Iz metoda toplotne integracije procesa razvijena je tehnika koja omogućava energetske integracije na nivou više procesa međusobno povezanih preko zajedničkog sistema pomoćnih medijuma (energana). Ova tehnika omogućava da se za dati sistem procesa odredi najoptimalnija konfiguracija sistema pomoćnih medijuma koja bi omogućila najefikasnije iskorišćenje energije dobijene sagorevanjem fosilnih goriva.

Sadašnji nivo industrijskog razvoja zahteva metode koje bi omogućile energetske integracije više nezavisnih postrojenja koja se nalaze u okviru industrijskog kompleksa. Uspostavljanje energetske integracije na ovom nivou dodatno bi povećalo energetske efikasnosti postrojenja, a to bi dovelo i do smanjenja potrošnje fosilnih goriva i smanjenja emisije. Cilj istraživanja ove doktorske disertacije je razvoj nove metode za energetske integracije više nezavisnih industrijskih postrojenja u jednom industrijskom kompleksu. Metoda je zasnovana na termodinamičkim zakonitostima, uz implementaciju kriterijuma pouzdanosti, mogućnosti kontrole i ekonomske održivosti.

Doktorska disertacija biće prikazana kroz sledeća poglavlja: *Teorijski deo, Razvoj metode energetske integracije, Primena metode na studiju slučaja, Zaključak i Literatura.*

Poglavljje *Teorijski deo* obuhvata analizu dosadašnjih istraživanja koji se odnose na:

- Značaj upotrebe kombinovanog procesa za proizvodnju toplote i električne energije,
- Metode za toplotnu integraciju procesa,
- Projektovanje mreža razmenjivača toplote u procesima,
- Metode za energetske integracije postrojenja,

- Numeričke metode za rešavanje linearnih i nelinearnih optimizacionih problema.

Poglavlje *Razvoj metode energetske integracije* detaljno opisuje razvoj primenjene metode. Odrediće se podaci koje je neophodno sakupiti za dalju analizu i biće izvršeno preliminarno definisanje potencijalnih izvora toplote upotrebom eksergetske analize. Definisaće se optimizacioni problem koji omogućava proračunavanje veza i parametara u cilju određivanja maksimalne energetske efikasnosti industrijskog kompleksa. Nakon određivanja maksimalne efikasnosti, definisaće se optimizacioni problem koji ima za cilj povećanje energetske efikasnosti u industrijskom kompleksu, a koja je optimalna sa ekonomskog stanovišta.

U Poglavlju *Primena metode na studiju slučaja*, biće detaljno opisana primena metoda na zamišljeni industrijski kompleks.

U *Zaključku* će se prikazati suština analize dobijene na osnovu sumiranih rezultata izvedenih ispitivanja .

U delu *Literatura* biće dat pregled referenci koje su prikupljene, analizirane i korišćene u doktorskoj disertaciji.

2. Teorijski deo

U okviru ovog proglavlja obrađeno je nekoliko tačaka veoma bitnih za energetske integraciju procesa: značaj upotrebe kombinovanog procesa proizvodnje toplote i električne energije u svetskoj industriji, pregled najznačajnijih metoda za energetske integraciju, kao i pregled optimizacionih algoritama koji se koriste pri njihovom rešavanju.

2.1. Značaj upotrebe kombinovanog procesa za proizvodnju toplote i električne energije u svetskoj industriji

Povećanje energetske efikasnosti je jedan od najvažnijih koraka u pravcu održivog razvoja, zaštite životne sredine i ekonomskog rasta. Najveći zagađivač životne sredine je procesna industrija sa skoro 1/3 ukupne emisije ugljen-dioksida (CO_2) u atmosferu. Ogromna količina fosilnih goriva, a samim tim i energije, troši se u industriji, što dovodi do zaključka da povećanjem energetske efikasnosti u njima može dovesti do značajnog smanjenja emisije CO_2 .

Tokom poslednjih decenija energetske zahtevi neprekidno rastu i to najviše u zemljama u razvoju, naročito u Kini. Energetska efikasnost određene grane industrije razlikuje se od države do države i najveća je u razvijenim zemljama. Sveukupna svest, kako izvršnih organa država tako i stanovništva za očuvanjem životne sredine primoravaju proizvođače ka procesima sa manjom emisijom CO_2 . Evropska komisija je 2002. godine predložila uvođenje taksi za emisiju CO_2 , tako da su proizvođači primorani da usmeravaju investicije u smeru povećanja energetske efikasnosti procesa.

Energetska efikasnost se poboljšava u svim industrijskim granama širom sveta jer se primenjuje najsavremenija tehnologija i to najviše u industrijama kod kojih je energija najveći ekonomski izdatak. Iako je energetska efikasnost povećana, ukupna potrošnja fosilnih goriva i emisija CO_2 raste usled rasta proizvodnje.

Povećanje energetske efikasnosti može se ostvariti kroz optimizaciju postojećih procesa i postrojenja ili uvođenjem novih, energetske manje zahtevnih tehnologija. Međunarodna Agencija za Energiju (IEA) procenjuje da se primenom najsavremenijih tehnologija može uštedeti između

25 i 37 EJ/god [1]. S obzirom da cena foslinih goriva raste, procenjene uštede dovode i do povećanja profitabilnosti.

Pored uvođenja novih tehnologija, energetska integracija je jedan od načina za povećanje energetske efikasnosti, koja može biti na nivou procesa ili na nivou postrojenja. Uobičajno je da u procesnim industrijama energane obezbeđuju potrebnu energiju za odvijanje procesa. U njima se sagorevanjem goriva dobija para visokog pritiska, koja se propušta kroz turbo generatore, pri čemu se generiše električna energija, a preostali deo pare se odvodi dalje ka postrojenju. Na ovaj način se odvija kombinovana proizvodnja toplote i električne energije ili kogeneracija, što predstavlja jedan od načina energetske integracije na nivou postrojenja. Izveštaj IEA prikazuje ko su najveći zagađivači životne sredine među procesnim industrijama, kao i procenjeni potencijal za povećanje energetske efikasnosti. U ovom izveštaju prikazan je potencijal za uštedu fosilnih goriva primenom energetske integracije. Primenom energetske integracije može doći do smanjenja upotrebe energije između 2 do 3 EJ/god, odnosno 48-72 Mt/god goriva i 110-170 MtCO₂/god [2].

Mnoge metode za ispitivanje potrošnje goriva i emisije CO₂ se baziraju na indikatorima, koji postoje u mnogim postrojenjima širom sveta [3]. Načini na koji se definišu indikatori su veoma važni, i oni su različiti od zemlje do zemlje, kao i od industrijskog sektora. Indikatori pokazuju kolika je potrošnja goriva i emisija CO₂ određenog postrojenja pri određenom načinu proizvodnje. Zatim se na osnovu podataka koji ukazuju kolika bi potrošnja goriva i emisija CO₂ bila pri primeni najsavremenijih tehnologija određuje moguće povećanje energetske efikasnosti datog postrojenja. Na osnovu ovih podataka se vrši određivanje potencijala za povećanje energetske efikasnosti širom sveta u različitim proizvodnim procesima.

Potrošnja goriva i emisija CO₂ zavise od kvaliteta sirovina i vrste goriva koja se upotrebljavaju, a koji su različiti za pojedine države. Procesi koji koriste ugalj kao izvor energije su manje efikasni od procesa gde se koristi prirodni gas ili električna energija. Neki proizvodi imaju u sebi određenu količinu CO₂ koju mogu osloboditi prilikom njihove upotrebe. To je obično u sintetičkim organskim proizvodima, pa se i ova količina CO₂ mora uzeti u obzir. Značajan deo industrijske emisije CO₂ predstavljaju emisije vezane za proces prelaska sirovina u proizvode, bez obzira na upotrebu fosilnih goriva. Pri kombinovanoj proizvodnji toplote i električne energije dolazi do potrošnje fosilnih goriva. Višak proizvedene električne energije se može prodati trećem

licu. _Može se optimizovati i sistem energana za kombinovanu proizvodnju toplote i električne energije na taj način da ukupna potrošnja goriva, emisija CO₂ i profit budu što povoljniji. U industriji proizvodnje celuloze, papira i štampe kombinovana proizvodnja toplote i električne energije igra važnu ulogu zbog velike upotrebe vodene pare, tako da je veoma važno pri razmatranju ove industrije definisati način na koji su prikupljeni podaci o kombinovanoj proizvodnji toplote i električne energije.

U hemijskoj i petrohemijskoj industriji koristi se negde oko 30% ukupne potrošnje energije u svetu [4]. Procenjuje se da je mogućnost uštede energije za proizvodnju olefina i aromata oko 10%, a za polivinilhlorid do 40% [4]. Postoji velika mogućnost za smanjenje emisije CO₂ u ovoj oblasti industrije optimizacijom kombinovane proizvodnje toplote i električne energije. Povećanje emisije CO₂ u atmosferu u ovoj grani industrije zavisi i od vrste goriva koje se upotrebljava. Na primer, u Kini se uglavnom upotrebljava ugalj kao fosilno gorivo što dovodi do manje energetske efikasnosti u odnosu na upotrebu prirodnog gasa kao goriva. Procenjuje se da bi smanjenje emisije štetnih gasova, u ovoj oblasti industrije, primenom najsavremenijih tehnologija bilo i do 20% [4]. Energetskom integracijom gasnih turbina sa razmenjivačima toplote koji služe za krekovanje, može doći do uštede specifične energije za proizvodnju etilena za oko 10-20% od ukupnog zahteva za energijom [4].

Pri proizvodnji kaustične sode (NaOH), osnovni način za smanjenje upotrebe fosilnih goriva, a samim tim i povećanja energetske efikasnosti, je prelaz proizvodnje sa živinog procesa i procesa pomoću dijafragme, na membransku tehnologiju. Prilikom proizvodnje natrijum karbonata potrebne su velike količine vodene pare, pri čemu para niskog pritiska čini najveći deo. Ona se direktno uvodi u proces za regeneraciju amonijaka (parno – stripovanje), tako da je u cilju povećanja energetske efikasnosti postrojenja potrebno uključiti dodatne jedinice za kombinovanu proizvodnju toplote i električne energije.

Potrošnja energije prilikom proizvodnje amonijaka smanjena je za 30% u poslednjih tridesetak godina, što predstavlja značajnu uštedu imajući u vidu da se skoro 20% ukupne potrošnje energije u hemijskoj industriji troši na proizvodnju amonijaka [4]. Prosečna potrošnja energije postrojenja za proizvodnju amonijaka koja se baziraju na reformingu prirodnog gasa u Sjedinjenim Američkim Državama i Evropi iznosi između 35 i 38 GJ/t amonijaka [4].

Hemijska i petrohemijska industrija spadaju u najveće korisnike kombinovane proizvodnje toplote i električne energije još od osamdesetih godina prošlog veka. Pomoću kogeneracije se povećava energetska efikasnost, ekonomičnost, smanjuje se emisija štetnih gasova i dolazi do poboljšanja energetske sigurnosti. Izveštajem iz 2004. godine je procenjeno da se u Sjedinjenim Američkim Državama 24 GW ili 34% kogeneracionog potencijala nalazi u hemijskoj industriji, a takođe postoji mogućnost za poboljšanjima od 7.8 GW električne energije i 0.5 EJ pare [5]. Prema izveštaju kompanije ExxonMobile kogeneracioni kapacitet u njegovim postrojenjima je 3.7 GW u 2006. godini ili što je ekvivalentno smanjenju emisije CO₂ od 9 Mt/god. Ova kompanija planira da poveća ovaj kapacitet za 35% do 2010. godine [5]. U Tabeli 1.1. prikazani su podaci za upotrebu kogeneracije u hemijskoj i petrohemijskoj industriji [6].

Tabela 1.1. Upotreba kombinovane proizvodnje toplote i električne energije u hemijskoj i petrohemijskoj industriji

Zemlja	Procenjena upotreba kombinovane proizvodnje toplote i električne energije, GW	Godina
Sjedinjene Američke Države	24	2004.
Japan	1.6	2006.
Nemačka	2.6	2003.
Holandija	0.3	2003.
Španija	0.6	2003.
Kina	3.0	2005.
Italija	0.7	2003.
Rusija	0.7	2004.
Kanada	1.7	2004.

Kad je u pitanju industrija gvožđa i čelika količina iskorišćene energije i emisija CO₂ zavise od vrste sirovina koje se koriste, kao i od efektivnosti proizvodne tehnologije [7]. Za industriju gvožđa i čelika je karakteristično da je u poslednjih dvadesetak godina povećala svoju energetska efikasnost. Srednji rast energetske efikasnosti nije se značajno uvećao usled povećane proizvodnje u Kini, koja ima relativno nisku srednju efikasnost. Višak energije koji se uklanja iz proizvodnog procesa se koristi za generisanje električne energije ili za grejanje/hlađenje stambenih objekata. Ovakav vid integracije karakterističan je za visoko razvijene države i u

zemljama sa visokom cenom energije, kao i sa rigoroznim zakonima vezanim za energetska efikasnost. Skoro polovina ukupne svetske proizvodnje gvožđa i čelika, kao i emisija CO₂ iz ove industrije nalazi se u Kini, Indiji, Rusiji i Ukrajini [8]. Energetska efikasnost ove industrije u navedenim zemljama je značajno manja nego u razvijenim zemljama. Najveći razlog ovoga su upotreba zastarele tehnologije, korišćenje uglja kao fosilnog goriva i korišćenje nisko kvalitetne rude. Na osnovu poređenja sa savremenim tehnologijama, mogućnost povećanja energetskog potencijala u svetu u ovoj industriji iznosi od 2.3 do 2.9 EJ/god, odnosno smanjenje emisije CO₂ od 220 do 270 Mt/god [9]. Količina starog gvožđa, koja se reciklira pri proizvodnji čelika se povećala značajno u poslednjim decenijama, ali njegov udeo u ukupnoj proizvodnji čelika je smanjen [10]. Razlog ovome je značajan porast proizvodnje čelika širom sveta, kao i veliki rast proizvodnje čelika u Kini. Smatra se da je količina starog gvožđa koja se reciklirala u 2003. godini oko 260 Mt [11]. U Kanadi je izvršeno istraživanje koje je upoređivalo postojeća postrojenja za proizvodnju čelika u Kanadi sa postrojenjima koja primenjuju najsavremeniju tehnologiju. Utvrđeno je da je potencijal za povećanje energetske efikasnosti 25-30%, a jedan od četiri moguća načina za povećanje energetske efikasnosti predstavlja i kogeneracija upotrebom toplote iz dimnih gasova [12]. Na osnovu izveštaja IEA korišćenjem procesa suvog gašenja koksa, prilikom proizvodnje čelika, može se dobiti oko 0.5 tona vodene pare (480 °C, 60 bara) po toni koksa što ekvivalentno 1.5 GJ energije po toni koksa, koja se može iskoristiti za proizvodnju električne energije [13]. Energetska efikasnost pri proizvodnji čelika zavisi od veličine visokih peći. Veće peći imaju veću efikasnost od manjih, zbog manjih gubitaka toplote usled manjeg odnosa površine prema zapremini. U Kini emisija CO₂ bi se umanjila za 37 Mt/god, povećanjem efikasnosti peći [14]. Dimni gasovi iz visokih peći mogu služiti za dobijanje pare i električne energije (kogeneracija). Ukoliko je temperatura dimnih gasova dovoljno visoka može se generisati vodena para dovoljno visokog pritiska za pokretanje protiv-pritisnih turbina, dovodeći do smanjenja potrošnje električne energije. Smatra se da je moguće smanjenje emisije CO₂ u ovoj oblasti industrije od 220 do 360 MtCO₂/god [15].

Kad je u pitanju industrija mineralnih materijala, za proizvodnju cementa se troši negde oko 8 EJ energije ili 70 do 80% od ukupne energije koja se koristi u ovoj grani industrije. Ova industrija je značajan izvor emisije CO₂ oko 1.8 Gt CO₂ u 2005. godini [16]. Kina je najveći proizvođač cementa. Srednja energetska efikasnost proizvodnje cementa se svuda povećala u poslednjim decenijama. Najznačajniji porast energetske efikasnosti je u Kini, zbog njenog velikog

industrijskog rasta. Drugi mineralni materijali, kao što su kreč, staklo, cigla i keramički proizvodi, troše negde od 20 do 30% energije u ovoj grani industrije i odgovorni su za oko 20% CO₂ emisije [17]. Energetski najintenzivniji deo mineralnih materijala industrije predstavlja proizvodnja keramičkih materijala. Industrija mineralnih materijala je odgovorna za 10% ukupne industrijske upotrebe energije i značajne emisije CO₂, i to najviše pri proizvodnji cementa i kreča [18]. Emisija CO₂ od strane ove industrije je negde oko jedne četvrtine ukupne emisije CO₂ od strane proizvodnih industrija. Cement se puno koristi kao konstrukcioni materijal. Kina je najveći proizvođač građevinskih materijala u svetu, oko 50% ukupne svetske proizvodnje nalazi se u njoj [19]. U Japanu se nalaze postrojenja koja imaju jednu od energetski najefikasnijih tehnologija za proizvodnju cementa. Jedna od mogućnosti za povećanje energetske efikasnosti je upotreba neiskorišćene toplote za proizvodnju električne energije. Na primer, postrojenja za proizvodnju cementa u Japanu proizvode oko 10% njihove potrebe za električnom energijom pomoću kombinovane proizvodnje toplote i električne energije [20]. Kina razvija tehnologiju za proizvodnju električne energije od neiskorišćene toplote i smatra se da je ovaj potencijal negde od 35 do 40 KWh/t klinkera koji je međuproizvod pri proizvodnji cementa [21]. Iako postoji velika mogućnost za povećanje energetske efikasnosti pomoću kogeneracije, do sada je jedino Japan iskoristio ovu mogućnost. Korišćenje alternativnih goriva u industriji cementa omogućava smanjenje cene proizvodnje, raspolaganje otpadom, smanjenje CO₂ emisije i korišćenja fosilnih goriva. U većini zemalja potrošnja električne energije po toni cementa je između 90 i 120 KWh [22].

Industrija celuloze, papira i štampe koristi mali deo energije koja se koristi u industriji. Ova industrija je trošila negde oko 6.45 EJ energije u 2004. godini, što predstavlja negde oko 5.7% ukupne energije koja se troši u industriji [23]. Pri proizvodnji celuloze i papira, skoro polovina energije koja se troši se dobija iz ostataka biomase i korišćenjem kombinovane proizvodnje toplote i električne energije. Zbog korišćenja bioenergije, emisija CO₂ nije visoka, ali i potencijal za smanjenje emisije CO₂ je ograničen. Postoji velika razlika u potrošnji energije pri proizvodnji celuloze i papira u različitim državama, zbog različitih faktora kao što su procesi koji se koriste, veličina postrojenja, tehnologija koja se upotrebljava, kvalitet sirovina, cena goriva i privrženost menadžmenta za povećanje energetske efikasnosti. Korišćenje viška toplote na efikasniji način može dovesti do značajnih ušteda. Takođe, povećanje reciklovanja papira je jedan od načina za smanjenje potrošnje energije u ovoj industriji. Efikasnost korišćenja toplotne energije se značajno

povećala između 1990. i 2003. godine, ali i dalje postoji potencijal za unapređenjima od 14%, ako bi se koristila najsavremenija tehnološka dostignuća [24]. Potencijal za povećanje energetske efikasnosti u industriji celuloze i papira iznosi oko 1 EJ/god, za veću reciklažnu brzinu i kogeneraciju ukupni potencijal za uštedu bi mogao dostići od 2.1 do 2.4 EJ/god [25]. Pošto se u ovoj industriji koristi velika količina vodene pare, kombinovana proizvodnja toplote i električne energije predstavlja poželjnu tehnologiju. Većina modernih mlinova za papir ima svoju sopstvenu kogeneracionu jedinicu. Za razliku od drugih industrija, koja su veliki potrošači energije, značajne količine toplote i električne energije se dobijaju iz sopstvenih energana. Pri proizvodnji celuloze, električna energija koja se troši, skoro se 90% pretvara u toplotu, tako da postoji velika mogućnost za prevođenje neiskorišćene toplote u električnu energiju [26]. Povezivanjem procesa pri proizvodnji celuloze postoji veliki potencijal za kombinovanu proizvodnju toplote i električne energije. Uvođenje kombinovane proizvodnje toplote i električne energije, dovodi do smanjenja upotrebe goriva od 10 do 20% [27]. U Tabeli 1.2 su prikazani procenjena upotreba kombinovane proizvodnje toplote i električne energije, u odnosu na ukupne zahteve za električnom energijom, za proizvodnju celuloze i papira u nekoliko država u 2003. godini [28].

Tabela 1.2 Prikaz korišćenja kombinovane proizvodnje toplote i električne energije u industriji celuloze i papira, u različitim zemljama u 2003. godini

Zemlja	Procenjena upotreba kombinovane proizvodnje toplote i električne energije, %
Kanada	19
Finska	32
Francuska	18
Nemačka	27
Italija	26
Španija	61
Švedska	22
Velika Britanija	40

Kako bi postigao najveći stepen termičke efikasnosti, kombinovano postrojenje za proizvodnju toplote i električne energije treba da bude projektovano tako da obezbedi zahteve za toplotom. U mnogim slučajevima ovo nije najekonomičnija alternativa zato što cena električne energije ne

opravdava dodatne investicije. U poređenju sa drugim industrijama, korišćenje kombinovane toplote i električne energije u industriji celuloze i papira je visoko. Ako se uzmu u obzir zemlje koji su najveći proizvođači celuloze i papira, smatra se da se kogeneracijom proizvodi između 20 i 50% električne energije koja se koristi u proizvodnji [29]. Istraživanja su pokazala da se povećanjem upotrebe kogeneracije može uštedeti između 0.3 i 0.6 EJ energije [29].

Više od polovine energije koja se troši za proizvodnju nebojenih metala se upotrebljava za proizvodnju aluminijuma. Topionice aluminijuma potrošile su oko 1.7 EJ električne energije u 2004. godini ili oko 3.5% svetske potrošnje električne energije [30]. Srednja potrošnja električne energije po toni aluminijuma je opala u poslednjih dvadeset pet godina. Upotrebom najsavremenijih tehnoloških dostignuća smanjenje energije pri proizvodnji aluminijuma može biti između 6 i 8% [30]. Velika količina aluminijuma se reciklira. Primarna proizvodnja aluminijuma je dvadeset puta energetski zahtevnija nego proizvodnja reciklažom. Najveća potrošnja energije u postrojenjima za proizvodnju aluminijuma je pri proizvodnji vodene pare, koja se koristi u glavnom procesu prerade. Zbog velikog zahteva za vodenom parom, moderna postrojenja koriste sisteme za dobijanje kombinovane toplote i električne energije. Na primer, u postrojenjima za dobijanje aluminijuma u Australiji srednja potrošnja goriva je 11 GJ/t aluminijuma, a ona se može smanjiti na 9.5 GJ/t aluminijuma boljom energetskom integracijom i poboljšanjem kogeneracionog sistema [31].

Procenjuje se da je potencijal za unapređenje potrošnje energije pri proizvodnji vodene pare u industriji od 10 do 15% [32]. Kombinovana proizvodnja toplote i električne energije je dokazana strategija za smanjenje emisije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte u industriji. Ukupno, kombinovana proizvodnja toplote i električne energije čini oko 10% ukupne proizvodnje električne energije u svetu [32]. Moguća ušteda energije pomoću kombinovane proizvodnje toplote i električne energije iznosi oko 5 EJ/god, što je negde oko 3 do 4% svetske industrijske potrošnje energije [32]. Optimizacijom sistema vodene pare može doći do generisanja viška pare koja se može upotrebiti za kogeneraciju. Period povraćaja uložених sredstava za projekat optimizacije sistema je obično kratak.

Kogeneracija se upotrebljava više od jednog veka u industrijama širom sveta. Mehanička energija koja se dobija glavnom se koristi za pokretanje turbo generatora za proizvodnju električne energije, ali se takođe može upotrebljavati za pokretanje druge opreme, kao što su kompresori i

pumpe. Toplotna energija sistema se direktno koristi u procesima, kao što su grejanje i sušenje. Kombinovana proizvodnja toplote i električne energije ima nekoliko prednosti u odnosu na sisteme koji proizvode samo električnu ili samo termičku energiju. Sistem kombinovane proizvodnje toplote i električne energije troši tri četvrtine energije koja je potrebna za rad odvojenog sistema proizvodnje električne energije i toplote. Kogeneracija je glavna strategija za smanjenje CO₂ emisije. Ona može dovesti do velikih ušteda tamo gde je razlika u ceni između prirodnog gasa (i drugih goriva) i električne energije dovoljno velika. Ukupna efikasnost kogeneracije za sistem koji se bazira na gasnim turbinama između 1 i 40 MW, iznosi od 70 do 75%, za odnos snage prema toploti od 0.5-1 [33]. Danska, Finska i Holandija uveliko prelaze na kombinovanu proizvodnju toplote i električne energije, a nekoliko zemalja ima veliki potencijal za povećanje upotrebe kogeneracije. Količina električne energije koja je proizvedena kogeneracijom se povećava i iznosi više od 6 EJ/god, što je više od 10% ukupne svetske proizvodnje električne energije, a količina toplote koja se dobija kogeneracijom iznosi između 5 do 15 EJ/god, što predstavlja značajan udeo za industriju [33].

2.2 Metode za energetske integracije procesa

Energetska integracija procesa je predmet istraživanja u poslednjih 50 godina, tokom kojih je razvijen veliki broj metoda koje omogućavaju značajnu uštedu energetske resursa. Problem energetske integracije procesa u obliku koji se danas koristi prvi su definisali Masso i Rudd 1969. godine, kao postupak projektovanja mreže razmenjivača toplote između skupa toplih i hladnih procesnih struja [34]. Prema Masso i Ruddu projektovane optimalne mreže razmenjivača toplote treba da obezbede minimalne godišnje investicione i operativne troškove procesa.

Prema principima na kojima su zasnovane, metode za energetske integracije procesa mogu se podeliti na termodinamičke i matematičke, dok se prema strategiji projektovanja mreže razmenjivača toplote mogu podeliti na sekvencijalne ili simultane. Izučavanje energetske interakcije procesa dovelo je do niza značajnih istraživanja koja mogu biti predstavljena hronološkim redom:

- Ten Broeck (1944.), prvi poznati rad koji razmatra projektovanje mreža razmenjivača toplote [35],

- Westbrook (1961.), prvo korišćenje matematičkog (dinamičkog) programiranja za projektovanje mreže razmenjivača toplote [36],
- Hwa (1965.), prvo korišćenje odvojenog programiranja i prvo korišćenje superstrukture za projektovanje mreže razmenjivača toplote [37],
- Rudd (1968.), dekompozicija problema procesne sinteze na podprobleme, uključujući i problem projektovanja mreže razmenjivača toplote [38],
- Masso i Rudd (1969.), prva publikovana definicija problema projektovanja mreže razmenjivača toplote [34],
- Kesler i Parker (1969.), publikovali su prvu metodu za projektovanje mreža razmenjivača toplote [39],
- Hohmann-ova doktorska teza (1971.). Hohmann-Lockart-ove kompozitne krive omogućavaju proračun minimalnih zahteva za grejanjem i hlađenjem procesa. Takođe, pravilo da je minimalan broj uređaja jednak broju procesnih struja umanjeno za jedan uvedeno je ovom doktorskom disertacijom. Ovom tezom postavljena je osnova za razvoj Pinch metode. Interesantno je spomenuti da je Hohmann dva puta pokušao da publikuje rad iz svoje doktorske teze i bio je odbijen [40],
- Mchalliard i Westerberg (1972.), prvi rad koji uključuje senzitivni pristup projektovanja mreže razmenjivača toplote [41],
- Umeda i autori (1978.) [42] i Linnhoff i Flower (1983.) [43,44]. Parovi za minimalnu potrošnju pomoćnih struja i minimalni broj uređaja su matematički formulisani koristeći "transshipment" model,
- Cerda i autori (1983.) [45] i Cerda i Westerberg (1983.) [46]. Problemi sa minimalnim brojem pomoćnih struja i minimalnim brojem parova su matematički formulisani koristeći transportni model,
- Papoulias i Grossmann (1983.). Problemi se minimalnim brojem pomoćnih struja i minimalnim brojem parova su matematički formulisani koristeći "transshipment" model [47],
- Linnhoff i Vredevelt (1984.), prvi rad u kome je prikazana metoda koja razmatra preuređenje postojeće mreže razmenjivača toplote [48],
- Tjoe i Linnhoff (1986.), objavljena je metoda bazirana na metodi "Pincha" za preuređenje postojeće mreže razmenjivača toplote [49],

- Li i Motard (1986.), razvijaju metodu za određivanje optimalne vrednosti minimalne razlike temperatura. Ova metoda je poznata pod imenom "Supertargeting" [50],
- Floudas i autori (1986.), razvoj računarskog programa za automatizovano projektovanje mreža razmenjivača toplote [51],
- Rev i Fonyo (1986.), identifikovali su pseudo-pinch tačku [52,53],
- Jones (1987.), razvijen vertikalni model za prenos toplote pri projektovanju mreža razmenjivača toplote [54],
- Yuan i autori (1989.) [55], Yee i Grossmann (1990.) [56] i Ciric i Floudas (1991.) [57], predložena je potpuna simultana formulacija za projektovanje mreže razmenjivača toplote.

U sledećoj tački ovog poglavlja dat je pregled najznačajnijih termodinamičkih i matematičkih metoda za energetske integracije procesa.

2.3 Termodinamičke metode za projektovanje mreže razmenjivača toplote

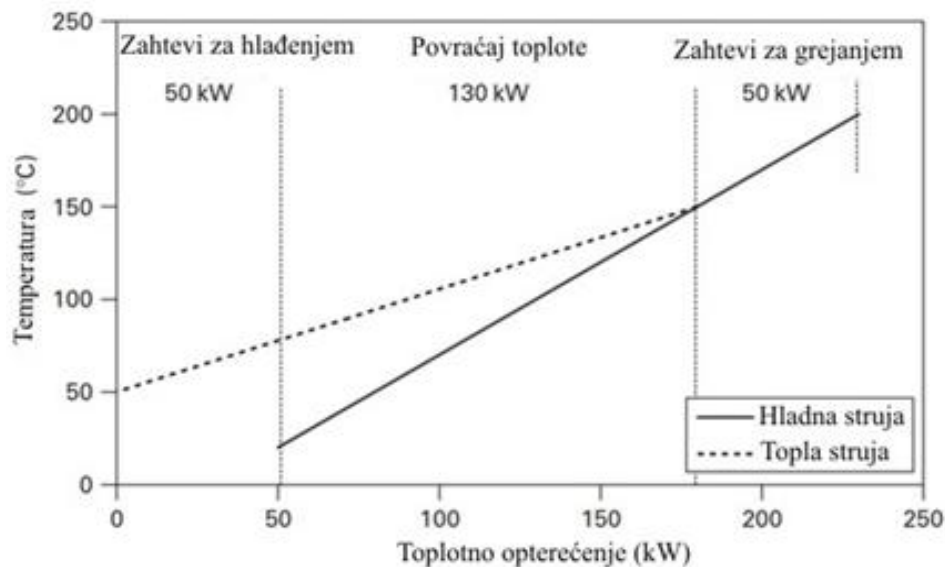
"Pinch" metoda je razvijena početkom sedamdesetih godina XX veka na "ETH" u Zurihi i Univerzitetu u Leedsu [43, 44]. Kompanija "ICI plc" prepoznala je mogućnosti ove tehnologije i vrlo brzo je uspostavljen istraživački tim za razvoj i njenu primenu. Metoda je postigla veliki uspeh pri projektovanju optimalne mreže razmenjivača toplote u rafinerijskoj i petrohemijskoj industriji [58]. Navedena metoda spada u grupu sekvencijalnih metoda, jer se sastoji iz niza uzastopnih koraka koji dovode do projektovanja optimalne mreže razmenjivača toplote. Koraci "Pinch" metode su:

- i) određivanje minimalnih potreba za grejanjem i hlađenjem,
- ii) određivanje operativnih troškova, odnosno optimalnog kvaliteta pomoćnih struja,
- iii) određivanje kapitalnih troškova,
- iv) određivanje optimalne vrednosti minimalne razlike temperature,
- v) projektovanje mreže razmenjivača toplote.

2.3.1 Određivanje minimalnih potreba za hlađenjem i grejanjem u procesu

Koncept "Pinch" metode zasniva se na temperaturno - entalpijskom profilu procesnih struja koje je potrebno hladiti, odnosno grejati. Radi lakšeg formulisanja problema, koncept uvodi sledeće

termine: (i) topla procesna struja predstavlja procesnu struju koju je potrebno hladiti i (ii) hladna procesna struja predstavlja procesnu struju koju je potrebno grejati. Na Slici 2.1 prikazan je temperaturno – entalpijski profil jedne tople i jedne hladne procesne struje.

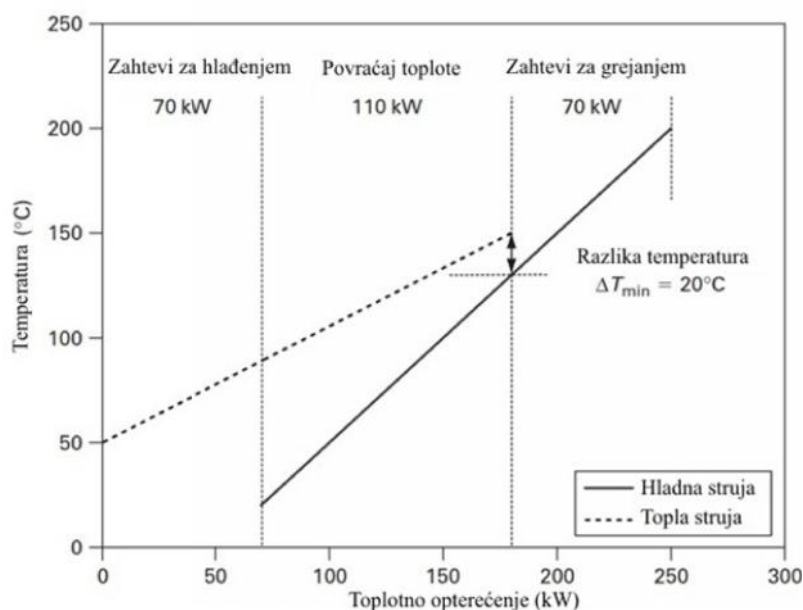


Slika 2.1 Temperaturno - entalpijski profili tople i hladne procesne struje

Slika 2.1 ukazuje da je od tople struje potrebno ukloniti 180 kW, dok je hladnoj struji potrebno dodati 180 kW. Na osnovu energetskog bilansa proizilazi da topla struja može kompletno da zagreje hladnu struju. To je praktično neizvodljivo jer se termička ravnoteža uspostavlja nakon razmene 130 kW. Vrednost temperature na kojoj je uspostavljena termička ravnoteža, naziva se temperatura "Pincha". Sa diagrama koji je prikazan na Slici 2.1, može se utvrditi da su potrebe za hlađenjem tople struje 50 kW, dok su potrebe za grejanjem hladne struje 50 kW.

Diagram prikazan na Slici 2.1 ukazuje koliki su minimalni zahtevi za grejanjem i hlađenjem, kao i kolika se količina toplote može razmeniti između toplih i hladnih struja kada je uspostavljena termička ravnoteža tj. kada je razlika temperatura u tački "Pincha" jednaka nuli. U slučaju kada je razlika temperatura jednaka nuli, razmenjivač toplote za maksimalnu razmenu toplote imao bi beskonačnu površinu, što je sa ekonomskog stanovišta neprihvatljivo. Iz tog razloga uvedena je veličina koju nazivamo "minimalna razlika temperatura" kojom je određena minimalna razlika temperatura tople i hladne struje u tački "Pincha". Na Slici 2.2 prikazan je temperaturno -

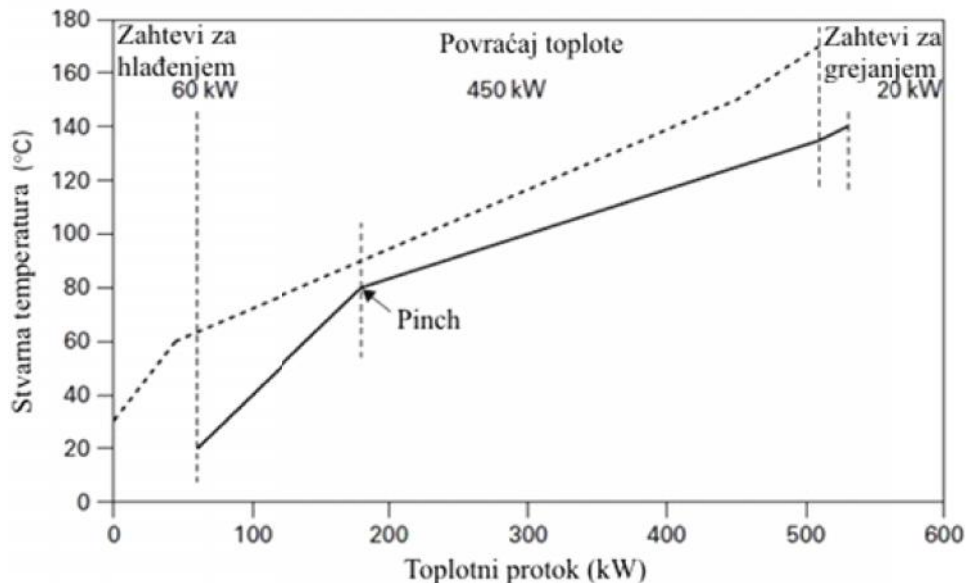
entalpijski profil tople i hladne struje pri minimalnoj razlici temperatura u tački "Pincha" od 20°C.



Slika 2.2 Temperaturno - entalpijski profil tople i hladne struje za minimalnu razliku temperature od 20°C

Poređenjem Slika 2.1 i 2.2, može se videti da povećanje minimalne razlike temperatura u tački "Pincha" dovodi do smanjenja razmene toplote, međutim, s druge strane smanjuje se površina potrebna za toplotnu razmenu što utiče na ekonomske karakteristike sistema. U daljem tekstu, prikazan je uticaj vrednosti minimalne razlike temperatura na vrednosti operativnih i kapitalnih troškova mreže razmenjivača toplote, kao i postupak njenog određivanja.

Koncept koji je prikazan za jednu toplu i jednu hladnu struju, može se uopštiti za N toplih i N hladnih struja (Slika 2.3), tako što se sumiraju sve količine toplote toplih i hladnih struja koje se nalaze u okviru određenog entalpijskog intervala. Na ovaj način se konstruiše po jedna kriva za tople i hladne struje u temperaturno - entalpijskom diagramu. Krive konstruisane na ovaj način nazivaju se "kompozitne krive".



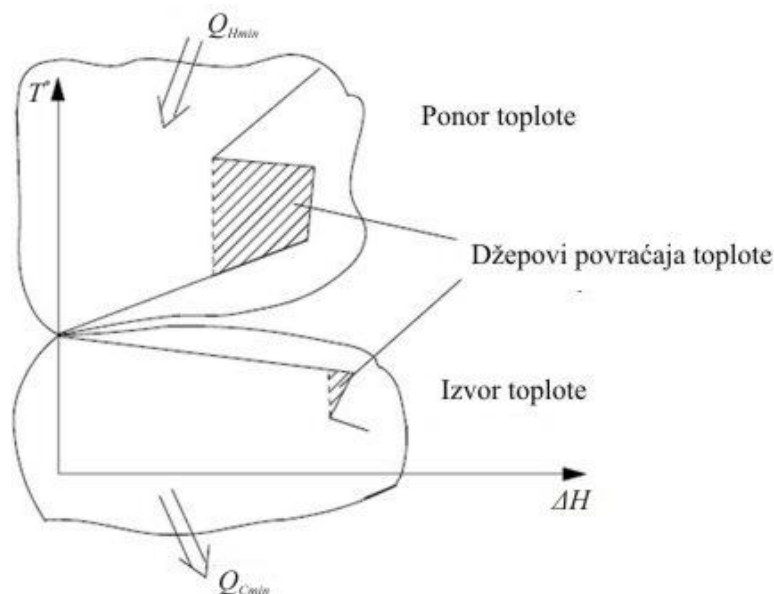
Slika 2.3 Temperaturno – entalpijski profili skupa toplih i hladnih procesnih struja

Diagrami temperatura – entalpija prikazani na Slikama 2.1, 2.2 i 2.3 ukazuju da je korišćenjem kompozitnih krivih moguće odrediti minimalne potrebe za grejanjem i hlađenjem sistema za određenu minimalnu razliku temperatura. Grafičko određivanje minimalnih zahteva za grejanjem i hlađenjem prikladna je za demonstraciju koncepta, međutim, ona nije prikladna za praktičnu primenu. Iz tog razloga, razvijen je numerički algoritam temperaturnih intervala koji omogućuje određivanje minimalnih zahteva za grejanjem i hlađenjem bez konstrukcije grafika [59,60].

2.3.2 Određivanje operativnih troškova

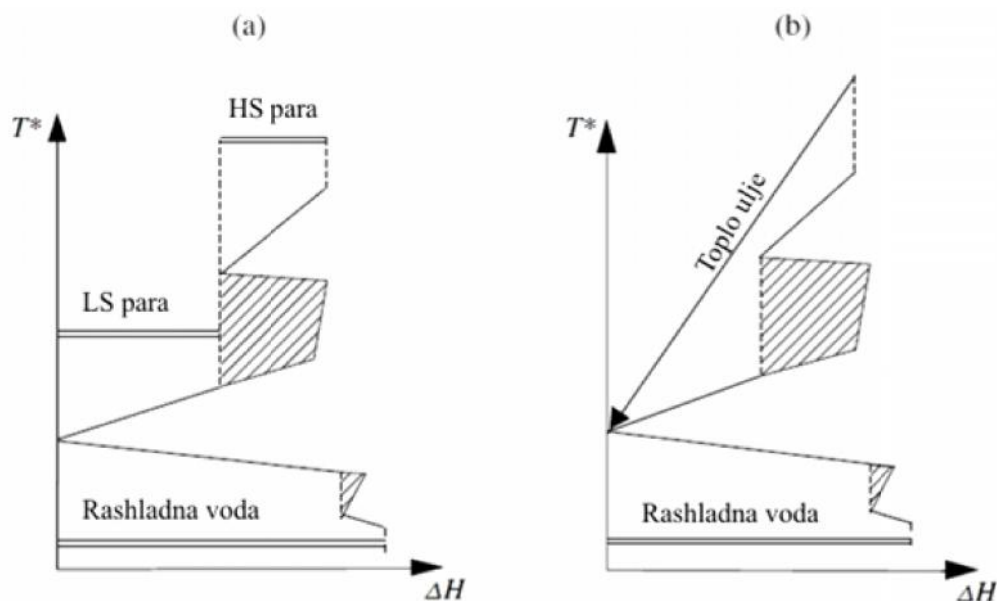
Nakon određivanja minimalnih potreba za hlađenjem i grejanjem procesa, potrebno je odrediti pomoćne struje koje ove potrebe obezbeđuju. Vodena para se najčešće upotrebljava kao topla pomoćna struja. Značajna karakteristika vodne pare je da se može uspostaviti na više različitih nivoa temperature i pritiska. Visoke temperature na koje je potrebno zagrejati hladne struje zahtevaju upotrebu peći ili sistema toplog ulja. Hladne pomoćne struje mogu biti voda, vazduh, rashladni fluidi itd.

Za određivanje odgovarajućih pomoćnih struja za dati proces konstruišu se tzv. “ukupne kompozitne krive” [61,62,63]. Procedura određivanja ukupne kompozitne krive zasniva se na unošenju količina toplote koje se prenesu kroz svaki temperaturni interval u diagram temperatura - entalpija. Ukupna kompozitna kriva prikazana je na Slici 2.4.



Slika 2.4 Ukupna kompozitna kriva

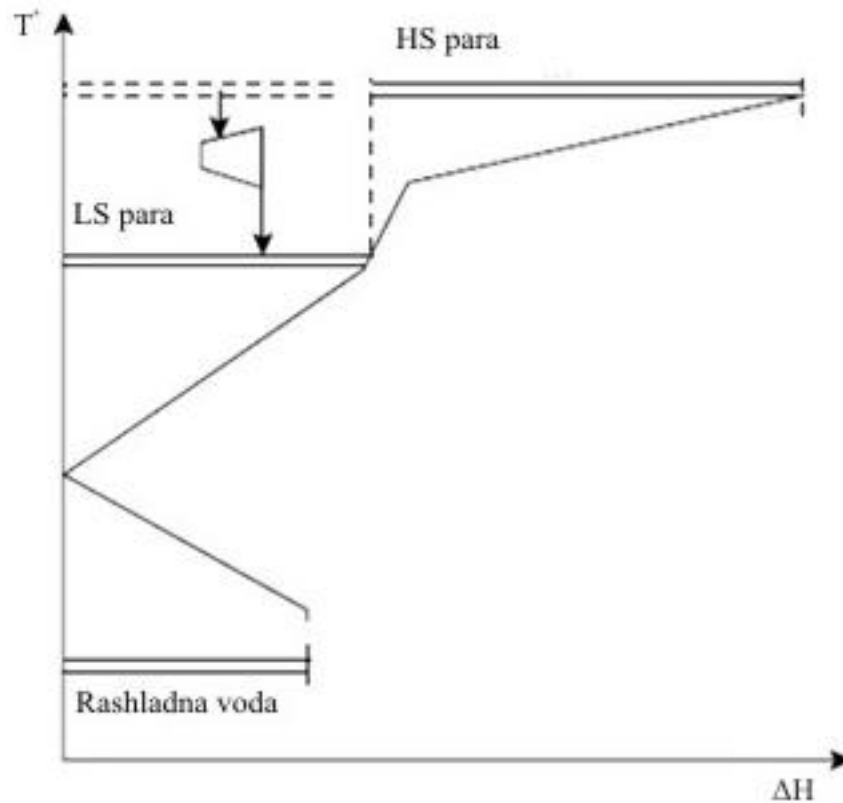
Treba imati na umu da profil ukupne kompozitne krive predstavlja toplotu koja preostaje nakon razmene toplote u svakom od temperaturnih intervala. Na ukupnoj kompozitnoj krivoj lako se uočava pozicija "Pincha" (tačka na diagramu u kojoj je $\Delta H=0$), kao i minimalni zahtevi za grejanjem (Q_{Hmin}) i hlađenjem (Q_{Cmin}). Deo iznad "Pincha" predstavlja deo ukupne kompozitne krive kojem se predaje toplota, pa se naziva ponor toplote, a deo ukupne kompozitne krive ispod "Pincha" predstavlja deo u kom se toplota odaje, pa se naziva izvor toplote. Osenčeni delovi ukupne kompozitne krive na Slici 2.4 predstavljaju mogućnosti za razmenu toplote između procesnih struja (džepovi povraćaja toplote). Na Slici 2.5 prikazana je ukupna kompozitna kriva sa pomoćnim strujama. Slika 2.5a prikazuje ukupnu kompozitnu krivu procesa sa vodenom parom na niskom (LS) i visokom pritisku (HS) kao toplim pomoćnim strujama i rashladnom vodom kao hladnom pomoćnom strujom. Slika 2.5b prikazuje ukupnu kompozitnu krivu procesa sa toplim uljem kao toplom pomoćnom strujom i rashladnom vodom kao hladnom pomoćnom strujom. Koja je od prikazanih opcija (Slika 2.5) najadekvatnija zavisi od ekonomskih i ekoloških faktora.



Slika 2.5 Ukupna kompozitna kriva sa pomoćnim strujama

Osenčeni delovi na Slikama 2.5a i 2.5b predstavljaju mogućnosti za razmenu toplote između procesnih struja (džepovi povraćaja toplote). Važno je napomenuti da se optimalne vrste i količine pomoćnih struja, odnosno operativni troškovi gore prikazanom procedurom, određuju za specifičnu minimalnu razliku temperatura.

Za temperature ispod 400°C vodena para kao pomoćna struja ima prednosti, zbog mogućnosti proizvodnje električne energije tokom procesa proizvodnje vodene pare određenog kvaliteta. Naime, vodena para se generiše u kotlovima sagorevanjem fosilnih goriva. Proizvedena vodena para je veoma visokog pritiska od 45 bar do 100 bar. Vodena para različitih temperatura zasićenja proizvodi se propuštanjem pare kroz turbine ili “let down” stanice. Upotreba turbina je adekvatnija alternativa, s obzirom da se tokom ovog procesa generiše osovinski rad koji se električnim generatorima prevodi u električnu energiju. Šematski prikaz generisanja električne energije prikazan je na Slici 2.6 [63]. Para visokog pritiska se propušta kroz turbinu do pare niskog pritiska i pritom se generiše električna energija.



Slika 2.6 Integracija parnih turbina u procesu

Nakon određivanja adekvatnih pomoćnih struja moguće je odrediti operativne troškove procesa iz sledeće jednačine:

$$OT = m_{goriva} \cdot C_{goriva} - P_{el} \cdot C_{elcena} \quad (2.1)$$

gde su: OT – operativni troškovi, m_{goriva} – maseni protok goriva, C_{goriva} – cena goriva, P_{el} – proizvedena električna energija, C_{elcena} – cena električne energije na tržištu.

2.3.3 Određivanje minimalnih kapitalnih troškova mreže razmenjivača toplote

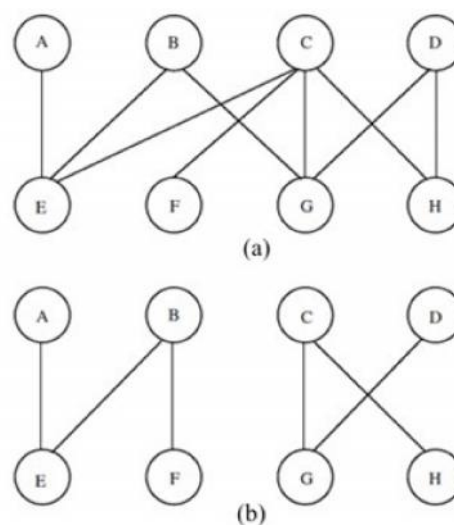
Nakon određivanja minimalnih operativnih troškova, da bi se projektovala optimalna mreža razmenjivača toplote potrebno je odrediti minimalne kapitalne troškove.

Osnovne komponente koje doprinose kapitalnim troškovima mreže razmenjivača toplote su: (i) broj uređaja (parovi između toplih i hladnih struja) i (ii) površina za toplotnu razmenu.

U ovom delu biće prikazan postupak kojim se određuju navedene komponente kapitalnih troškova upotrebom kompozitnih krivih procesa.

2.3.3.1 Broj uređaja za razmenu toplote

Kako bi prikazali način određivanja minimalnog broja uređaja u mreži razmenjivača toplote, koristićemo osnove teorije grafova [64,65]. Graf predstavlja bilo koji skup tačaka u kome su neki parovi tačaka povezani linijama. Na Slici 2.7a i 2.7b data su dva primera grafova koji prikazuju razmenu toplote između toplih i hladnih struja.



Slika 2.7 Šematski prikaz razmene toplote između toplih i hladnih struja

Tačke sa grafa odgovaraju procesnim i pomoćnim strujama, dok linije predstavljaju razmenu toplote između toplih i hladnih struja. Putanja predstavlja niz zasebnih linija koje su međusobno povezane. Na Slici 2.7a, linije između (tačaka) AECGD predstavljaju putanju. Graf formira jednu komponentu, ako se bilo koje dve tačke mogu spojiti putanjom. Slika 2.7b ima dve komponente, dok Slika 2.7a ima samo jednu. Petlja predstavlja putanju koja počinje i završava se u istoj tački, na primer CGDHC, na Slici 2.7a. U slučaju da dve petlje imaju zajedničku liniju, one se mogu povezati tako da formiraju treću petlju brisanjem zajedničke linije. Na Slici 2.7a to su petlje BGCEB i CGDHC, koje se mogu povezati dajući petlju BGDHCEB. U ovom slučaju kažemo da je treća petlja zavisna od druge dve.

Broj uređaja na osnovu teorije grafova, dobija se upotrebom sledeće jednačine [64]:

$$N_{uređaja} = S + L - C \quad (2.2)$$

gde su: $N_{uređaja}$ – broj parova ili uređaja (linija u teoriji grafa), S – broj struja uključujući pomoćne struje (tačke u teoriji grafa), L – broj nezavisnih petlji, C – broj komponenti.

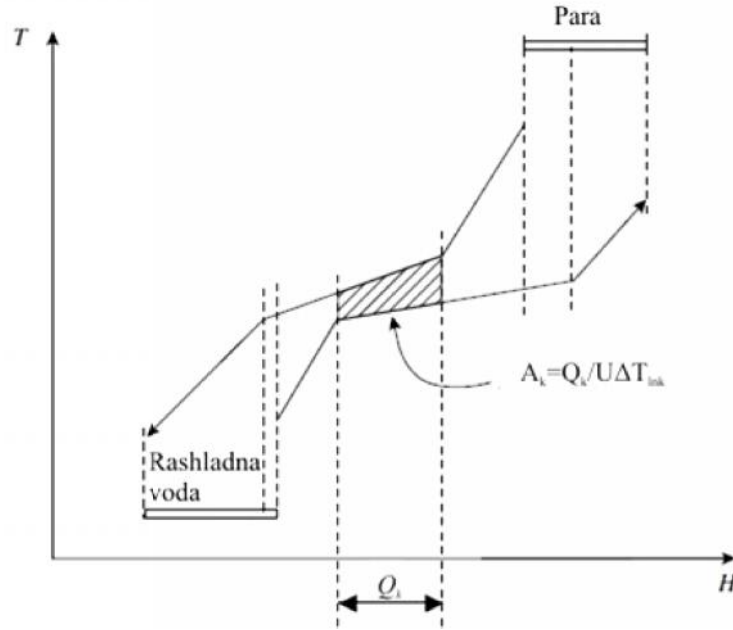
Krajnja konfiguracija mreže treba da sadrži najmanji broj uređaja da bi se smanjili kapitalni troškovi, iako ova komponenta nije jedina koja utiče na kapitalne troškove. Da bi broj uređaja sveli na minimalan, potrebno je da nema nezavisnih petlji ($L=0$), dok broj komponentata treba da bude maksimalan. Međutim, najjednostavnija pretpostavka je da postoji samo jedna komponenta, odnosno da je $C=1$. Sada dolazimo do specijalnog slučaja kada mreža ima jednu komponentu i kada je $L=0$ i on se može predstaviti sledećim izrazom [64,65]:

$$N_{uređaja} = S - 1 \quad (2.3)$$

Jednačina (2.3) ukazuje da je zahtevani minimalni broj uređaja manji za jedan od ukupnog broja struja, uključujući i pomoćne struje.

2.3.3.2 Određivanje površine za razmenu toplote

Pomoću kompozitnih krivih možemo proceniti površinu za razmenu toplote mreže razmenjivača toplote. Da bi izračunali površinu mreže pomoću kompozitnih krivih, pomoćne struje moraju biti uključene sa procesnim strujama u kompozitne krive, pri čemu se dobijaju tzv. uravnotežene kompozitne krive [65]. Rezultujuća uravnotežena kompozitna kriva ne bi trebalo da ima dodatne zahteve za pomoćnim strujama. Uravnotežene kompozitne krive su podeljene na vertikalne entalpijske intervale, kao što je prikazano na Slici 2.8.



Slika 2.8 Uravnotežene kompozitne krive i odgovarajući entalpijski intervali

Na Slici 2.8 Q_k - predstavlja toplotu koja se razmenjuje u datom entalpijskom intervalu k_{ei} , A_k – predstavlja površinu za razmenu toplote u okviru datog entalpijskog intervala k_{ei} , U – je ukupni koeficijent prenosa toplote, a ΔT_{lnk} – je srednja logaritamska razlika temperatura za dati entalpijski interval k_{ei} . Ako se pretpostavi da je ukupni koeficijent prenosa toplote u procesima konstantan i da se prenos toplote odvija u suprotno - strujnim razmenjivačima toplote, tada je zahtevana površina za entalpijski interval k_{ei} data sledećim izrazom [64,65]:

$$A_{MREŽE, k_{ei}} = \frac{\Delta H_{k_{ei}}}{U \Delta T_{lnk_{ei}}} \quad (2.4)$$

gde su: $A_{MREŽE, k_{ei}}$ – površina za toplotnu razmenu za vertikalni prenos toplote u entalpijskom intervalu k_{ei} , $\Delta H_{k_{ei}}$ – promena entalpije u entalpijskom intervalu k_{ei} , $\Delta T_{ln, k_{ei}}$ – srednja logaritamska razlika temperatura za entalpijski interval k_{ei} i U – ukupni koeficijent prenosa toplote. Ukupna površina za razmenu toplote svih entalpijskih intervala se određuje sledećom jednačinom [64,65]:

$$A_{MREŽE} = \frac{1}{U} \sum_{k_{ei}}^{intervala K_{ei}} \frac{\Delta H_{k_{ei}}}{\Delta T_{lnk_{ei}}} \quad (2.5)$$

gde su: $A_{MREŽE}$ – površina za toplotnu razmenu za vertikalni prenos toplote za celu mrežu, K_{ei} – ukupan broj entalpijskih intervala.

Uticaj koeficijenata prenosa pojedinih struja se može prikazati sledećim izrazom [65,66]:

$$A_{MREŽE} = \sum_{k_{ei}}^{intervala K_{ei}} \frac{1}{\Delta T_{lnk_{ei}}} \left[\sum_i^{tope struje i} \frac{q_{i,k_{ei}}}{h_i} + \sum_j^{hladne struje j} \frac{q_{j,k_{ei}}}{h_j} \right] \quad (2.6)$$

gde su: $q_{i,k_{ei}}$ – količina toplote koju može da oda topla struja i u entalpijskom intervalu k_{ei} , $q_{j,k_{ei}}$ – količina toplote koju može da prihvati hladna struja j u entalpijskom intervalu k_{ei} , h_i , h_j – koeficijenti prenosa za toplu struju i i hladnu struju j (uključujući zid i otpor onečišćenja), I – ukupan broj toplih struja u entalpijskom intervalu k_{ei} , J – ukupan broj hladnih struja u entalpijskom intervalu k_{ei} i K_{ei} – ukupan broj entalpijskih intervala.

Jednačina (2.6) omogućava određivanje površine mreže razmenjivača toplote na osnovu vertikalnog modela razmene toplote, ako se koeficijenti prenosa razlikuju od struje do struje. Ukoliko postoje velike razlike koeficijenata prenosa, jednačina (2.6) ne predviđa stvarnu minimalnu površinu mreže. Ukoliko je razlika koeficijenata prenosa između struja veoma velika tada je potrebno nevertikalno povezivanje da bi se dobila minimalna površina. Uprkos ovim nedostacima metoda za određivanje površine, data jednačinom (2.6), se može upotrebljavati za procenu kapitalnih troškova.

2.3.3.3 Izračunavanje ukupnih kapitalnih troškova

Da bi predvideli ukupne kapitalne troškove mreže razmenjivača toplote, pretpostavlja se da se cena koštanja jednog razmenjivača toplote sa površinom za razmenu A , može prikazati sledećim izrazom:

$$Instalirani kapitalni troškovi razmenjivača = a + b \cdot A^c \quad (2.7)$$

gde su: a , b , c – konstante koštanja koje variraju u zavisnosti od konstrukcionog materijala, pritiska i tipa razmenjivača.

Kada se određuje cena, raspodela površina između razmenjivača mreže je nepoznata. Da bi se odredila cena mreže pomoću jednačine (2.7), određena raspodela površina mora biti

pretpostavljena. Najjednostavniji način raspodele površina je da svi razmenjivači imaju istu površinu. Tako da se kapitalni troškovi mreže mogu prikazati sledećim izrazom:

$$KP = N \left[a + b \left(\frac{A_{mreže}}{N} \right)^c \right] \quad (2.8)$$

gde je: N – broj jedinica ili omotača, u zavisnosti šta je pogodnije.

2.3.4 Određivanje optimalne vrednosti minimalne razlike temperature

Operativni i kapitalni troškovi se izračunavaju za različite vrednosti minimalne razlike temperatura. Za optimalnu minimalnu razliku temperatura se bira ona za koju je zbir operativnih i kapitalnih troškova minimalan. Sa promenom minimalne razlike temperature ΔT_{min} menjaju se operativni i kapitalni troškovi mreže razmenjivača toplote. Povećanjem ΔT_{min} smanju se kapitalni troškovi, ali se povećavaju operativni troškovi, dok se smanjenjem povećavaju kapitalni, a smanjuju operativni troškovi. Da bi se projektovala optimalna mreža razmenjivača toplote potrebno je da suma operativnih i kapitalnih troškova bude minimalna, odnosno potrebno je odrediti ΔT_{min} za koje imamo kompromis između energetske i kapitalne troškova, odnosno za koje su ukupni troškovi minimalni. Funkcija cilja za određivanje minimalne razlike temperature može se definisati kao:

$$\min \left(OP + \frac{KP}{OLP} \right) \quad (2.9)$$

gde je: OLP – procenjeni životni vek postrojenja

2.3.5 Projektovanje mreže razmenjivača toplote

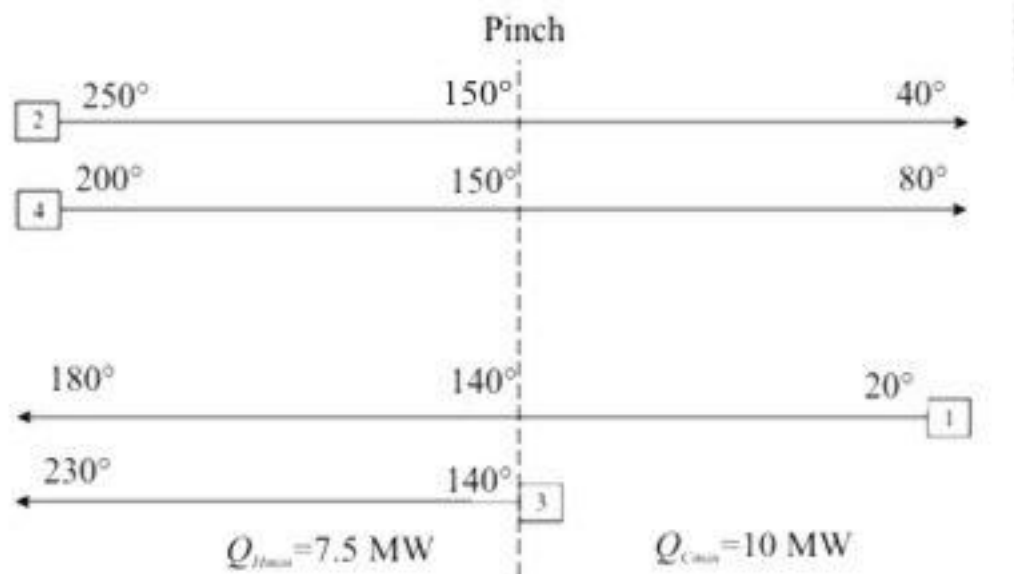
Nakon određivanja ciljeva, odnosno minimuma karakterističnih vrednosti za mrežu razmenjivača toplote, sledeći korak je projektovanje mreže razmenjivača toplote.

Osnovna pravila "Pinch" metode upućuje da ukoliko se želi ostvariti maksimalna ušteda energije: toplota ne sme prolaziti kroz "Pinch", odnosno zahtevi za hlađenjem iznad "Pincha" i zahtevi za grejanjem ispod "Pincha" imaju nultu vrednost.

Proces je potrebno podeliti u tački "Pincha" i ovo je potrebno uneti u mrežni diagram, kako je dato Tabelom 2.1 i prikazano Slikom 2.9. Tabelom 2.1 dati su podaci za hladne i tople procesne struje, kao što su tip struje, ulazna temperatura struje, izlazna temperatura struje, količina toplote koja je potrebna datoj struji za grejanje ili hlađenje, kao i vrednosti vodenih ekvivalenata. Takođe, pretpostavljene vrednosti, za ovaj slučaj, za minimalnim zahtevima za grejanjem i hlađenjem iznose 7.5 MW i 10 MW respektivno. Na Slici 2.9 prikazan je mrežni diagram na kojoj se vidi početna i krajnja temperatura toplih i hladnih struja, kao i vodeni ekvivalenti za date struje. Takođe, na Slici 2.9 je prikazana lokacija "Pinch", kao i temperature "Pincha" za tople i hladne struje.

Tabela 2.1 Procesni podaci za tople i hladne procesne struje

Tip	Ulazna temperatura, $T_s(^{\circ}C)$	Izlazna temperatura, $T_T(^{\circ}C)$	$\Delta H(MW)$	Toplotni kapacitet(MW/C)
Hladna	20	180	32.0	0.2
Topla	250	40	-31.5	0.15
Hladna	140	230	27.0	0.3
Topla	200	80	-30.0	0.25



Slika 2.9 Mrežni diagram procesnih struja

Potrebe za grejanjem iznad tačke "Pincha" obezbeđuju se upotrebom vodene pare (Q_{Hmin}), dok se za potrebe hlađenja ispod "Pincha" koristi se rashladna voda (Q_{Cmin}). Onaj deo toplote koji se ne može obezbediti hladnim strujama preko razmene toplote sa toplim strujama iznad "Pincha" se obezbeđuje upotrebom vodene pare (Q_{Hmin}), a onaj deo toplote ispod "Pincha" koji se ne može oduzeti toplim strujama razmenom toplote sa hladnim strujama se obezbeđuje pomoću rashladne vode (Q_{Cmin}). Metoda "Pincha" uvodi sledeće kriterijume projektovanja mreže razmenjivača toplote:

1. U tački "Pincha" postoji minimalna razlika temperatura između svih toplih i hladnih struja. Na osnovu ovoga, broj izvodljivih parova u ovom regionu je strogo ograničen.
2. Da bi povezivanje toplih i hladnih struja bilo izvodljivo iznad "Pincha", potrebno je da vodeni ekvivalent hladne struje bude veći od vodenog ekvivalenta tople struje, odnosno treba da važi sledeći izraz [67,68]:

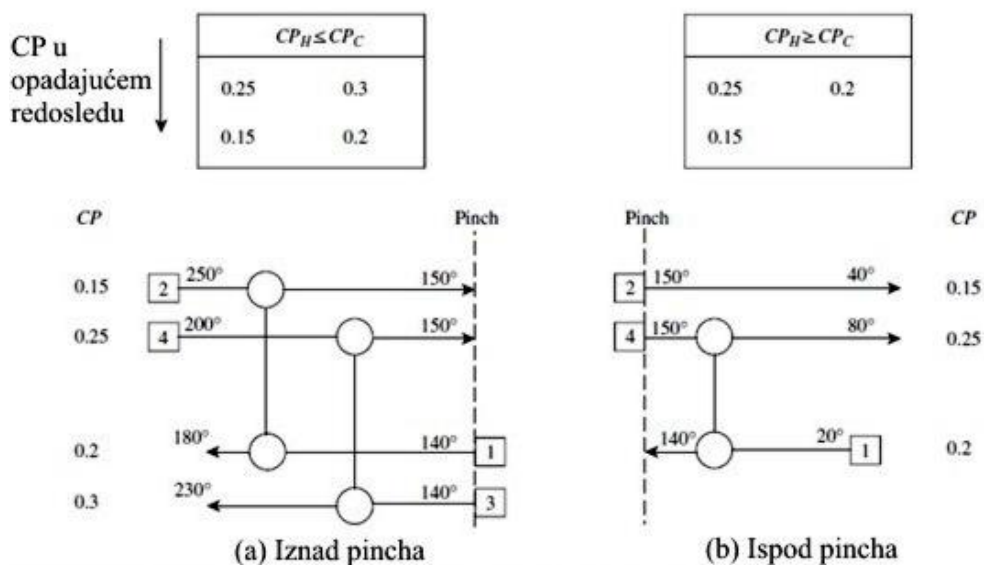
$$CP_H \leq CP_C \quad (2.10)$$

gde su: CP_H - vodeni ekvivalent tople procesne struje i CP_C - vodeni ekvivalent hladne procesne struje.

Da bi ispod "Pincha" temperaturna razlika između tople i hladne struje bila veća od ΔT_{min} , potrebno je da vodeni ekvivalent tople struje bude veći od vodenog ekvivalenta hladne struje, odnosno treba da važi sledeći izraz [67,68]:

$$CP_H \geq CP_C \quad (2.11)$$

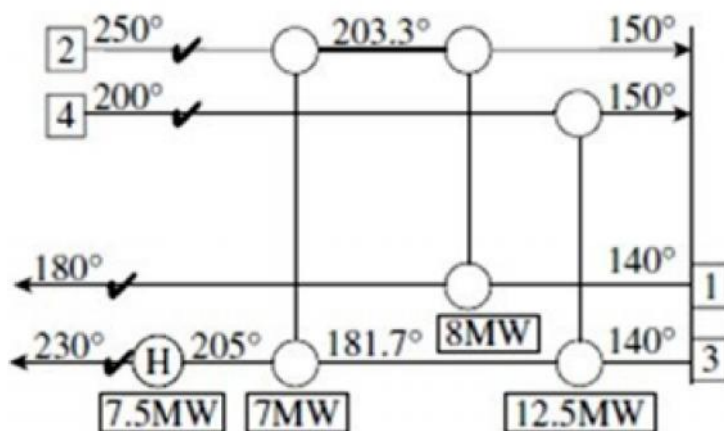
3. Nalaženje parova u regionu "Pincha" se ostvaruje pomoću tabele vodenih ekvivalenata (CP tabela) [67,68]. U CP tabeli vrednosti vodenih ekvivalenata za tople i hladne struje su date u opadajućem redosledu (Slika 2.10). Slika 2.10a prikazuje mrežni diagram sa CP tabelom za projektovanje iznad "Pincha". Kao što se sa slike 2.10a vidi, jedine izvodljive veze između toplih i hladnih procesnih struja su one za koje važi uslov dat jednačinom (2.10). Hladne pomoćne struje se ne smeju koristiti iznad "Pincha", što znači da se tople struje moraju ohladiti do tačke "Pincha" razmenom toplote sa hladnim procesnim strujama. Tople pomoćne struje se mogu koristiti za grejanje hladnih struja iznad "Pincha". Dakle, potrebno je povezati toplu struju sa odgovarajućom hladnom strujom iznad "Pincha". Na Slici 2.10a je prikazan prikladan raspored iznad "Pincha", koji ne koristi temperaturnu razliku manju od ΔT_{min} . Slika 2.10b prikazuje mrežni diagram sa CP tabelom za projektovanje ispod "Pincha". Kao što se sa slike vidi jedina mogućnost za povezivanje tople i hladne procesne struje ispod "Pincha" je ukoliko važi uslov dat jednačinom (2.11).



Slika 2.10 Povezivanje toplih i hladnih struja iznad i ispod "Pincha"

Topla pomoćna struja se ne sme koristiti ispod "Pincha", što znači da se hladne struje moraju zagrejati do temperature "Pincha" razmenom toplote sa hladnim pomoćnim strujama. Hladne pomoćne struje se mogu koristiti za hlađenje toplih struja ispod "Pincha".

4. Kada su izabrani parovi oko "Pincha", da bi se zadovoljili zahtevi za minimalnom energijom, projektovanje se nastavlja tako da kapitalni troškovi budu minimalni. Kod kapitalnih troškova važnu ulogu ima broj uređaja. "Tick-off" pravilo se koristi kako bi se broj uređaja sveo na minimum. Ovo pravilo nalaže da uređaji moraju biti što veći, odnosno uzima se da je razmenjena toplota u uređaju jednaka onom sadržaju toplote koji je manji u datom paru. Na Slici 2.11 dat je prikaz parova struja iznad "Pincha", kod kojih imamo najveći mogući uređaj za dati par, odnosno najveću moguću razmenu toplote za dati par tople i hladne struje.

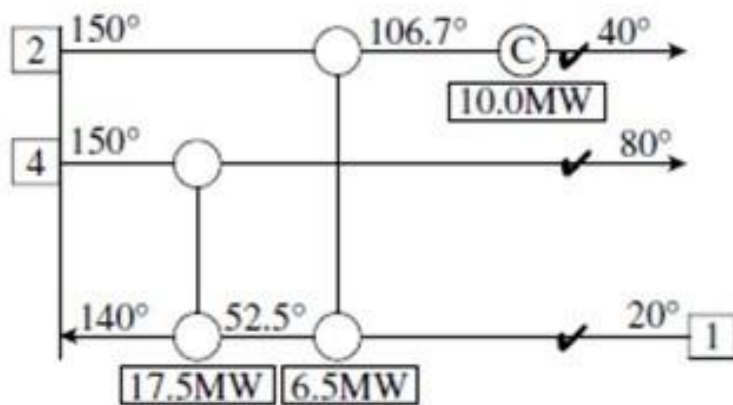


Slika 2.11 Izgled mreže razmenjivača iznad "Pincha" nakon upotrebe "tick-off" pravila

Tople struje se hlade do tačke "Pincha" razmenom toplote sa hladnim strujama. Takođe, hladne struje se greju do krajnjih temperatura razmenom toplote sa toplim strujama, a onaj deo toplote koji se ne može dopremiti pomoću toplih struja se obezbeđuje pomoću toplih pomoćnih struja (H).

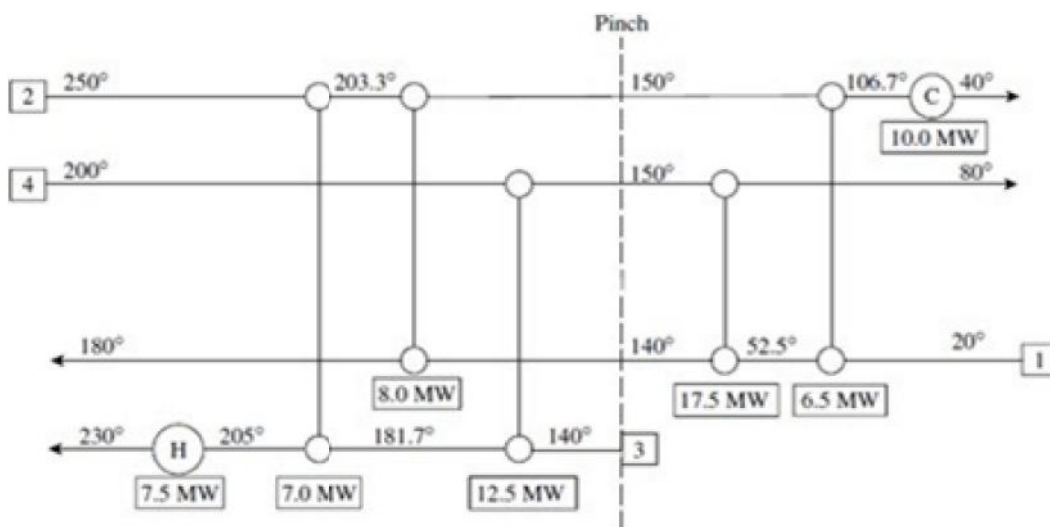
Na Slici 2.12 dat je prikaz parova struja ispod "Pincha". Hladne struje se greju do tačke "Pincha" razmenom toplote sa toplim strujama. Tople struje se hlade do odgovarajućih krajnjih

temperatura, a onaj deo toplote koji se ne može ukloniti pomoću hladnih struja se uklanja upotrebom hladnih pomoćnih struja (C).



Slika 2.12 Izgled mreže razmenjivača ispod "Pincha" nakon upotrebe "tick-off" pravila

Krajnji izgled mreže razmenjivača toplote dat je Slikom 2.13, koja je dobijena spajanjem Slika 2.11 i 2.12.



Slika 2.13 Optimalna konfiguracija mreže razmenjivača toplote

Uzimajući u obzir pretpostavljene vrednosti za minimalne zahteve za grejanjem i hlađenjem 7.5 MW i 10 MW respektivno, vidi se da je data mreža zadovoljila ove zahteve. Ukoliko se pretpostavi da je minimalni broj uređaja koji je potreban za projektovanje mreže sedam, tada se vidi da je konfiguracija mreže data slikom 2.13 zadovoljila i ovaj zahtev.

2.4 Matematičke metode za energetske integracije procesa

Osnovne karakteristike "Pinch" metode su:

- Unapred specificirana minimalna razlika temperatura,
- Tačan iznos potrošnje pomoćnih struja se može predvideti pre projektovanja mreže razmenjivača toplote,
- "Pinch" temperatura omogućava da se projektovanje mreže razmenjivača toplote razložiti na dve podmreže (iznad i ispod "Pinch"),
- Najmanji broj uređaja u svakoj podmreži je jednak broju procesnih struja umanjениh za jedan,
- Određuje minimalnu površinu za razmenu toplote u mreži.

Navedene karakteristike značajno sužavaju alternative za projektovanje mreže i same po sebi ne obezbeđuju eksplicitnu proceduru za dobijanje konfiguracije mreže razmenjivača toplote. Odnosno, korisnik treba da metodom probe i greške ispita parove i međusobne veze između procesnih struja, da bi krajnji rezultat zadovoljio unapred određene vrednosti potrošnje pomoćnih struja, broja uređaja i ukupne površine. Vrlo često ovo nije jednostavan zadatak, naročito ako postoji projektni problem sa velikim brojem procesnih struja. Ako bi se oslonili samo na koncept "Pinch", teško je razviti kompjuterski program, koji može automatski da projektuje mrežu razmenjivača toplote željene strukture (na primer, sa razdvajanjem struja ili bypass-om struja). Mreža koja zadovoljava date ciljeve ne mora da odgovara konfiguraciji sa minimalnom cenom. Optimalna ukupna cena koštanja mreže zavisi od minimalne razlike temperatura ΔT_{min} , koja je usvojena. Ukoliko je manja minimalna razlika temperatura ΔT_{min} , manji su i troškovi pomoćnih struja, koji su potrebni za proces. Sa smanjenjem minimalne razlike temperatura ΔT_{min} , povećavaju se i ukupni kapitalni troškovi, zbog povećanja površine za toplotnu razmenu.

Iz svega navedenog, može se zaključiti da "Pinch" metoda ima dosta nedostataka. Iz tog razloga, razvijene su matematičke metode za energetske integracije procesa. U ovom poglavlju biće prikazani osnovni algoritmi za projektovanje mreže razmenjivača toplote. Biće prikazane dve glavne strategije projektovanja mreže razmenjivača toplote: sekvencijalna i simultana.

Za sekvencijalni metod je karakteristično da nizom koraka dovodi do projektovanja optimalne mreže razmenjivača toplote. Tri osnovna (pod)problema koji se rešavaju u metodi "Pinch" pri projektovanju mreže razmenjivača toplote u sekvencijalnim matematičkim pristupima su:

- Minimalni zahtevi za pomoćnim strujama,
- Minimalni broj uređaja,
- Minimalna investiciona cena.

Za svaki od podproblema razvijen je adekvatni matematički model, koji uzima u obzir redosled razmenjivača, razdvajanje struja, mešanje i "bypass".

2.4.1 Sekvencijalno projektovanje mreža razmenjivača toplote

Optimizacioni algoritam za određivanje minimalnih zahteva za grejanjem i hlađenjem zasniva se na tzv. "transshipment" modelu. Ovu metodu razvili su Papoulias i Grossmann [47] na osnovu metode temperaturnih intervala.

"Transshipment model" za određivanje minimalnih zahteva za grejanjem i hlađenjem, pri datom broju toplih i hladnih pomoćnih struja može se formulisati na sledeći način. Sistem se deli na K_{ti} temperaturnih intervala, koji su definisani preko ulaznih i izlaznih temperatura procesnih struja. Kako bi se definisao problem potrebno je uvesti sledeće veličine [47]:

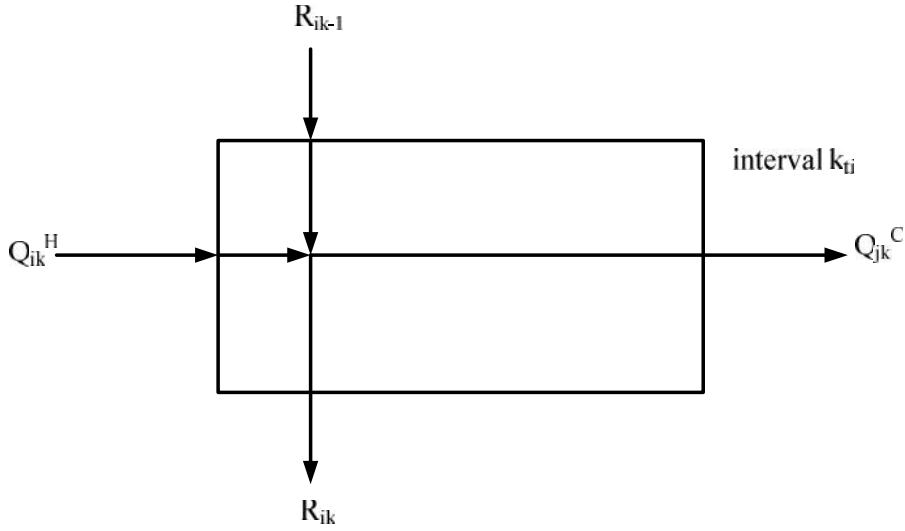
$H_k = \{i | \text{topla struja } i \text{ doprema toplotu u temperaturni interval } k_{ti}\};$

$C_k = \{j | \text{hladna struja } j \text{ zahteva toplotu iz temperaturnog intervala } k_{ti}\};$

$S_k = \{m | \text{topla pomoćna struja } m \text{ doprema toplotu u temperaturni interval } k_{ti}\};$

$W_k = \{n | \text{hladna pomoćna struja } n \text{ izdvaja toplotu iz temperaturnog intervala } k_{ti}\};$

Toplotni balans za temperaturni interval k_{ti} prikazan je na slici 2.14. Poznate veličine su: Q_{ik}^H, Q_{jk}^C - sadržaj toplote tople procesne struje i i hladne procesne struje j u temperaturnom intervalu k_{ti} . Promenljive veličine su: Q^S, Q^W - toplotno opterećenje toplih pomoćnih struja m i hladnih pomoćnih struja n ; R_k - ostatak toplote koji napušta interval k_{ti} .



Slika 2.14 Toplotni bilans za temperaturni interval k_{ti}

Minimalni zahtevi za grejanjem i hlađenjem za date tople i hladne procesne struje se mogu formulisati na sledeći način [47]:

Funkcija cilja:

$$\min Z \approx Q^S + Q^W$$

sa ograničenjima: $R_k - R_{k-1} - Q^S + Q^W = \sum_{i \in Hk} Q_{ik}^H - \sum_{j \in Ck} Q_{jk}^C, k_{ti}=1, \dots, K_{ti}$

$$Q^S \geq 0, Q^W \geq 0, R_k \geq 0 \quad k_{ti}=1, \dots, K_{ti}-1 \quad (2.12)$$

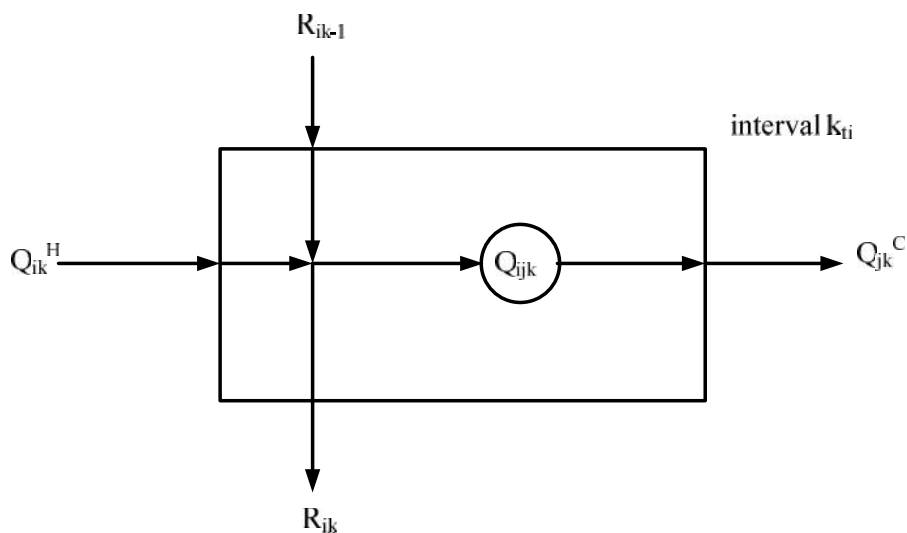
$$R_0 = 0, R_k = 0$$

U jednačini (2.12), funkcija cilja predstavlja ukupni zahtev za grejanjem i hlađenjem, dok K jednačina definišu toplotni balans oko svakog temperaturnog intervala k_{ti} . Primećuje se da će ovaj linearni problem biti mali, jer će imati jednačina K i $n_H + n_C + K - 1$ promenljivih. Model dat jednačinom (2.12) biće označen kao kondenzujući linearni "transshipment" model, da bi ga razlikovali od "transshipment" modela, koji će biti prikazan u daljem delu teksta za ograničene parove. Treba napomenuti i da je u gore navedenoj formulaciji lako nametnuti gornja ograničenja

toplotnih opterećenja koja su dostupna od strane nekih pomoćnih struja (na primer, maksimalna toplota od strane pare niskog pritiska).

2.4.1.1 Minimalni zahtevi za grejanjem i hlađenjem sa ograničenim parovima

U praksi nije uvek poželjno ili moguće razmenjivati toplotu između bilo kog datog para toplih i hladnih procesnih struja. Razlozi mogu biti raznovrsni, npr. struje su jako udaljene jedna od druge, povezivanjem određenog para toplih i hladnih procesnih struja sposobnost kontrole procesa se znatno umanjuje, mešanjem komponenata tople i hladne procesne struje dovodi do stvaranja zapaljivih ili toksičnih smeša što utiče na sigurnost procesa, itd. Može se zahtevati i postojanje određene minimalne i maksimalne količine toplote koju je potrebno razmeniti između određenih parova struja. Da bi navedene alternative ušle u razmatranje prilikom projektovanja mreže razmenjivača toplote, "transshipment" model je proširen dodavanjem seta ograničenja. "Transshipment" model koji uzima u obzir ograničenja vezana za povezivanje toplih i hladnih procesnih struja prezentovali su Papoulias i Grossmann [47]. Na slici 2.15 prikazan je osnovni koncept na kome je zasnovan model.

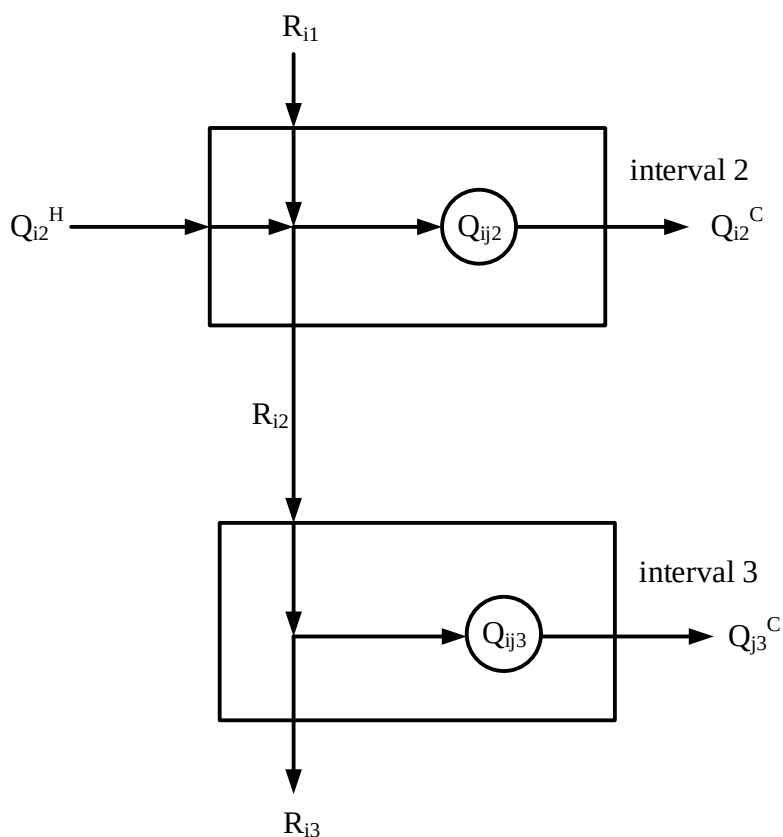


Slika 2.15 Toplotni bilans za temperaturni interval k_{ti} za prošireni "transshipment" model

Razlika između modela koji određuje minimalne zahteve za grejanje i hlađenjem, i modela sa ograničenjima je da se za svaku toplu procesnu struju i određuje protok toplote R_{ik} između

temperaturnih intervala k . Isto važi i za toplu pomoćnu struju m , za koju se određuje R_{ik} . U okviru temperaturnog interval k_{ti} definiše se promenljiva Q_{ijk} , kojom je predstavljena razmena toplote između tople struje i i hladne struje j . Slika 2.16 grafički prikazuje postavku modela za dva temperaturna intervala. Treba naznačiti da dati par struja može razmenjivati toplotu u okviru intervala ako važi bilo koji od sledećih uslova [47]:

1. Topla struja i i hladna struja j su prisutne u intervalu k_{ti} (Slika 2.15),
2. Hladna struja j je prisutna u intervalu k_{ti-1} , dok topla struja i je prisutna u višem intervalu (Slika 2.16).



Slika 2.16 Toplotni balans za dva temperaturna intervala za prošireni "transshipment" model

Na osnovu navedenog razmatranja može se definisati prošireni "transshipment" model, gde je uključena informacija o razmenjenoj toploti između svakog datog para struja. Kako bi se definisao problem potrebno je uvesti sledeće veličine:

$H'_k = \{i | \text{tople struje } i \text{ su prisutne u interval } k_{ti} \text{ ili na višem intervalu}\},$

$S'_k = \{m | \text{tople pomoćne struje } m \text{ su prisutne u interval } k_{ti} \text{ ili na višem intervalu}\},$

Promenljive modela su:

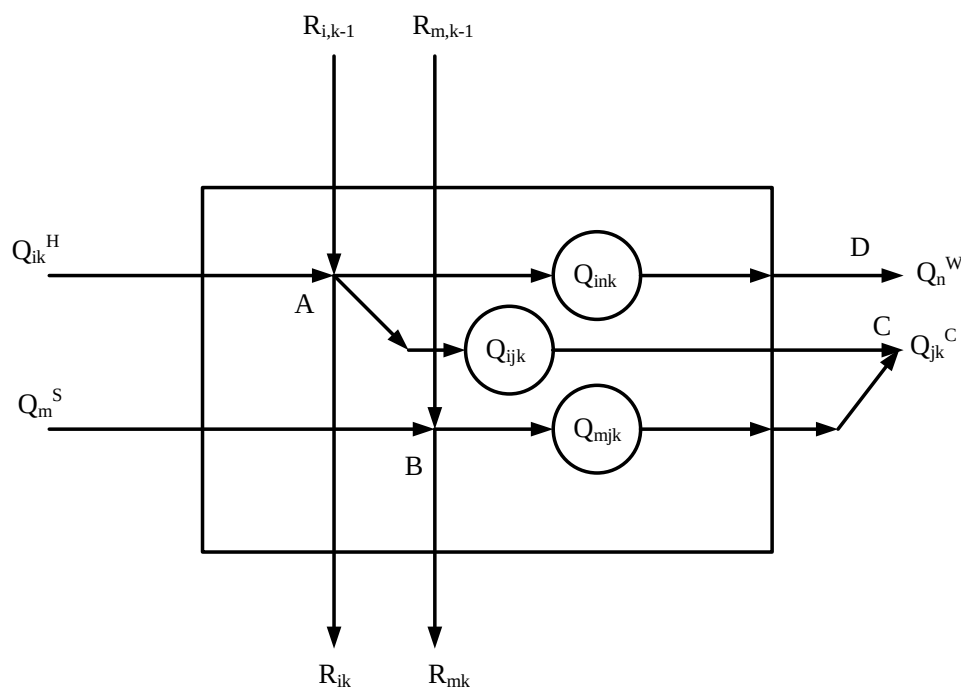
Q_{ijk} - razmenjena toplota tople struje i i hladne struje j u intervalu k_{ti} ,

Q_{mjk} - razmenjena toplota tople pomoćne struje m i hladne struje j u intervalu k_{ti} ,

Q_{ink} - razmenjena toplota tople struje i i hladne pomoćne struje u intervalu k_{ti} ,

R_{ik} – toplotni protok tople struje i koji napušta interval k_{ti} ,

R_{mk} - toplotni protok tople pomoćne struje m koji napušta interval k_{ti} .



Slika 2.17 Toplotni balans u proširenom "transshipment" modelu

Prikazani model se matematički definiše postavljanjem balansnih jednačina u određenim tačkama u svakom od temperaturnih intervala. Na primer, za toplu procesnu i toplu pomoćnu struju potrebno je postaviti toplotni balans u tačkama A i B datim na Slici 2.17; za hladne procesne i

hladne pomoćne struje potrebno je postaviti toplotni balans u tačkama C i D datim na Slici 2.17. Na osnovu gore navedenih razmatranja "transshipment" model definisan je setom jednačina:

Funkcija cilja

$$\min Z = Q^S + Q^W$$

$$\text{sa ograničenjima} \quad R_{ik} - R_{i,k-1} + \sum_{j \in C_k} Q_{ijk} + \sum_{n \in W_k} Q_{ink} = Q_{ik}^H \quad i \in H'_k$$

$$R_{mk} - R_{m,k-1} + \sum_{j \in C_k} Q_{mjk} - Q^S = 0 \quad m \in S'_k$$

$$\sum_{i \in H_k} Q_{ijk} + \sum_{n \in S_k} Q_{mjk} = Q_{jk}^C \quad j \in C_k \quad (2.13)$$

$$\sum_{i \in H_k} Q_{ink} - Q_n^W = 0 \quad n \in W_k \quad k_{ti} = 1, \dots, K_{ti}$$

$$R_{ik}, R_{mk}, Q_{ijk}, Q_{mjk}, Q_{ink}, Q^S, Q^W \geq 0$$

$$R_{i0} - R_{ik} = 0$$

Formulacije data setom jednačina (2.13) omogućava da se uvedu ograničenja na povezivanje parova toplih i hladnih procesnih struja. Na primer, ako se zahteva da se onemogući razmena toplote između tople struje i i hladne struje j , potrebno je definisati da je $Q_{ijk}=0$ za svaki temperaturni interval k_{ti} . U slučaju kada se želi nametnuti određeni par, jednostavno može se specificirati da ukupna razmenjena toplota mora biti u okviru neke određene donje i gornje granice, kako prikazuje jednačina (2.14).

$$Q_{ij}^L \leq \sum_{k=1}^K Q_{ijk} \leq Q_{ij}^U \quad (2.14)$$

gde su: Q_{ij}^L - donja granica razmenjene toplote između tople struje i i hladne struje j i Q_{ij}^U - gornja granica razmenjene toplote između tople struje i i hladne struje j .

2.4.1.2 Određivanje minimalnog broj uređaja

Metoda određivanje minimalnog broja uređaja polazi od rezultata dobijenih upotrebom „transshipment“ modela, tj. izračunatih vrednosti toplotnog opterećenja toplih i hladnih pomoćnih struja. Metoda za određivanje minimalnog broja uređaja razlaže sistem na q podmreža. Uobičajno je da sistem ima dve podmreže, odnosno mreža iznad i ispod "Pincha". U ovom delu će se prikazati kako se uvođenjem dodatnih ograničenja "transshipment" model dat jednačinom (2.13), može proširiti u cilju rigoroznog predviđanja najmanjeg broja uređaja, kao i parova struja koji su uključeni u svaki uređaj i količina toplote koju oni moraju razmeniti [69,70].

Do ove tačke izveden proračun za minimalne zahteve za grejanjem i hlađenjem, sa ili bez ograničenja parova, zna se koliko je toplotno opterećenje toplih i hladnih pomoćnih struja. U ovoj tački tople procesne i pomoćne struje se mogu tretirati jednostavno kao tople struje i , dok se hladne procesne i pomoćne struje mogu tretirati kao hladne struje j . Razlaganjem sistema na podmreže, svaka podmreža q ima K_q temperaturnih intervala. Da bi prikazali potencijalnu vezu datog para tople i hladne struje, definišće se sledeća binarna promenljivu u podmreži q :

$$y_{ij}^q = \begin{cases} 1, & \text{topla struja } i \text{ i hladna struja } j \text{ razmenjuju toplotu} \\ 0, & \text{topla struja } i \text{ i hladna struja } j \text{ nerazmenjuju toplotu} \end{cases} \quad (2.15)$$

Potrebno je napomenuti da se za svaki predviđeni par, koji je dat gore navedenom binarnom promenljivom sa vrednošću jedan, može vezati jedan razmenjivač toplote. Suma uređaja u podmreži data je sumom binarnih promenljivih, prikazane jednačinom (2.15). Cilj je da se minimizuje broj uređaja, tako da se funkcija cilja definiše sledećim izrazom:

$$\min \sum_{i \in H} \sum_{j \in C} y_{ij}^q \quad (2.16)$$

Ograničenja su definisana u jednačini (2.17):

$$\begin{aligned} R_{ik} - R_{i,k-1} + \sum_{j \in C_k} Q_{ijk} &= Q_{ik}^H \quad i \in H'_k \quad K = 1, \dots, K_q \\ \sum_{j \in H_k} Q_{ijk} &= Q_{jk}^C \quad j \in C_k \\ R_{ik}, Q_{ijk} &\geq 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

Pored ograničenja prikazanih jednačinom 2.17, potrebna su nam i ograničenja u slučaju kada binarna promenljiva uzima vrednost nula, kada odgovarajuća kontinualna promenljiva takođe ima nultu vrednost. U slučaju da par nije izabran ($y_{ij}^q = 0$), tada je razmenjena toplota za taj par jednaka nuli. Za bilo koji par toplih struja i i hladnih struja j , ovo ograničenje se može izraziti sledećim izrazom:

$$\sum_{n=1}^{K_q} Q_{ijk} - U_{ij} y_{ij}^q \leq 0 \quad (2.18)$$

U ovom slučaju, gornja granica U_{ij} će biti data najmanjim sadržajem toplote dve struje. Na primer, ako je toplotni sadržaj tople struje i 100 MW, a hladne struje j 200 MW, tada se može staviti da je U_{ij} 100 MW, pošto je ovo maksimalna količina toplote koju date dve struje mogu razmeniti.

Rešenje problema koji je definisan funkcijom cilja dat jednačinom (2.16), nula-jedan ograničenjima datim jednačinom (2.15) sa ograničenjima datim toplotnim balansima pomoću jednačina (2.17), logičkim ograničenjima datim jednačinom (2.18), određuje parove toplih i hladnih struja koje razmenjuju toplotu y_{ij}^q , kao i toplotnu razmenu koja se izvrši između parova

$\sum_{k=1}^{K_q} Q_{ijk}$. Dobijene informacije se mogu koristiti za dobijanje konfiguracije mreže razmenivača toplote ručno ili automatski.

2.4.1.3 Metoda sekvencijalnog projektovanja razmenjivača toplote

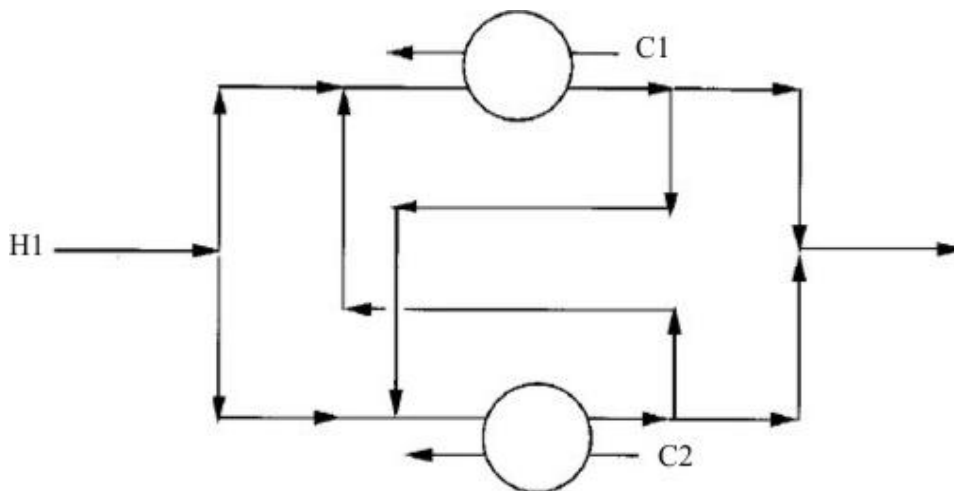
Metode sekvencijalnog projektovanja mreže razmenjivača toplote koristi strategiju podele problema na skup podproblema, koji se rešava sukcesivno u cilju projektovanja mreže razmenjivača toplote sa minimalnim ukupnim godišnjim troškovima. Za rešavanje podproblema koriste se (1) termodinamičke metode ("Pincha", dvostruke temperature i "Pseudo Pincha") i (2) matematičke metode koje su zasnovane na kontinualnim i celobrojnim linearnim i nelinearnim optimizacionim problemima.

Korišćenjem metoda za projektovanje koje su zasnovane na "Pinch" metodi, problem se deli na segment iznad i ispod tačke "Pinch", tako da se projektovanje mreže razmenjivača toplote deli na

dve oblasti. Na osnovu minimalne razlike temperatura mreže, dolazi se do lokacije uskog grla za uštedu energije koje omogućuje određivanje minimalnog korišćenja pomoćnih struja. Ova uska grla se nazivaju tačke "Pincha". Mreža razmenjivača toplote se tada rastavlja na podmreže i to na osnovu tačke "Pincha". Početna mreža dobija se povezivanjem toplih i hladnih procesnih struja oko tačke "Pincha". Naredna povezivanja toplih i hladnih procesnih struja se dobija na osnovu različitih smernica i pravila, sve dok se ne dobije mreža sa određenim brojem uređaja. Metoda dvostruke temperature dozvoljava razmenu toplote kroz tačku "Pincha". Ova metoda definiše dve vrste minimalne razlike temperatura i to: mreže i razmenjivača. Minimalne razlike temperatura mreže služi za određivanje lokacije tačke "Pincha", dok minimalna razlika temperatura razmenjivača određuje minimalnu razliku temperatura između tople i hladne procesne struje. Minimalna razlika temperatura u razmenjivaču dozvoljeno je da bude manja od minimalne razlike temperatura mreže. Metoda dvostruke temperature omogućava projektovanje mreže razmenjivača toplote sa manjim brojem uređaja i jednostavnije strukture, ali sa druge strane projektovana mreža ima veće kapitalne troškove nego mreža projektovana upotrebom metode "Pincha". Modifikacijom metode dvostruke razlike temperatura nastale su metode: pseudo-pincha (koji ublažava uslove "Pincha") i metod fleksibilnog "Pincha" (koji ima promenljivu minimalnu razliku temperatura).

Sekvencijalno projektovanje mreže razmenjivača toplote pomoću matematičkog programiranja sastoji se od rešavanja tri podproblema. Prvi podproblem je određivanje minimalne cene pomoćnih medijuma. Ovaj linearni problem (LP) se može formulisati tako da može da uključi mogućnost uvođenja ograničenja na povezivanje parova toplih i hladnih struja [47]. Drugi podproblem je određivanje minimalnog broja uređaja. Vertikalni modeli razmene toplote, predloženi od strane Gundersena i Grossmanna [74] omogućavaju određivanje parova struja na osnovu sortiranja, kako bi se proizvela mreža razmenjivača toplote sa nižim kapitalnim troškovima. Treći podproblem podrazumeva određivanje optimalne mreže razmenjivača toplote. Floudas i autori razvili su metod za automatsko projektovanje mreža razmenjivača toplote. Osnova metode je formiranje tzv. superstrukture (Slika 2.18) za svaku pomoćnu i procesnu struju na osnovu informacija dobijenih pomoću "transshipment" modela [51]. Svaki razmenjivač toplote u superstrukтури odgovara paru predviđenom od strane "transshipment" modela. Svaki razmenjivač će imati toplotno opterećenje koje je predviđeno od strane "transshipment" modela. Superstruktura predstavlja kompleksnu strukturu koja omogućava da se prikažu sve moguće

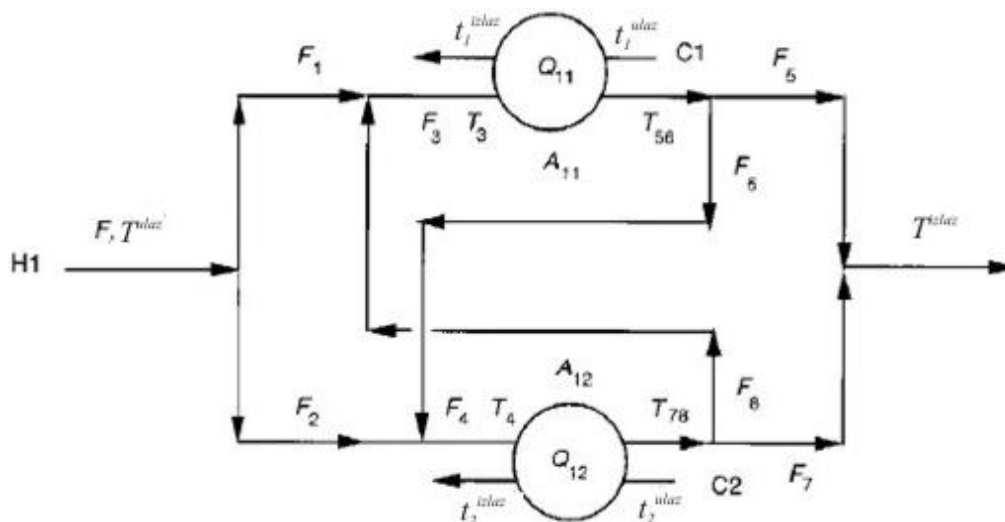
alternative povezivanja između toplih i hladnih struja. Primer takve superstrukture je dat na Slici 2.18 za slučaj jedne tople i dve hladne struje, gde su predviđena dva para H1-C1 i H1-C2.



Slika 2.18 Superstruktura za jednu toplu i dve hladne struje

Treba primetiti da se u ovoj superstrukтури struja $H1$ (topla struja) razdvaja na dve struje koje se usmeravaju na dva uređaja. Izlazi iz ovih uređaja su dalje razdvojeni na dve struje: jedna koja je usmerena na ulaz drugog uređaja i druga koja je usmerena na finalnu tačku mešanja. Superstruktura mreže data na Slici 2.18, definiše dve alternative za povezivanje u razmenjivaču: serijsko i paralelno.

Promenljive koje figurišu u modelu su sledeće: maseni/molški protoci (F, f), temperature (T, t), i površine (A), kako je predstavljeno na Slici 2.19.



Slika 2.19 Promenljive za superstrukuru sa dva razmenjivača toplote

Sledeće vrednosti su poznate:

- Za struju $H1$, maseni protok F i ulazne i izlazne temperature T^{in}, T^{out} ,
- Za struju $C1$, molski protok f_1 i ulazne i izlazne temperature t_1^{in}, t_1^{out} ,
- Za struju $C2$, molski protok f_2 i ulazne i izlazne temperature t_2^{in}, t_2^{out} ,
- Toplotna opterećenja Q_{11}, Q_{12} predviđena “transshipment” modelom.

Funkcija cilja, koja predstavlja minimizovanje investicionih troškova, data je sledećim izrazom:

$$\min C_{it} = c_1 A_{11}^b + c_2 A_{12}^b \quad (2.19)$$

gde su: c_1, c_2, β parametri troškova, a A površina razmenjivača toplote 11 i 12.

Funkcija cilja se može prikazati preko temperature, zamenom površine razmenjivača toplote preko projektne jednačine $Q = KA\Delta T_{ln}$, za suprotno - strujne razmenjivače toplote, gde je K - koeficijent prelaza toplote, a ΔT_{ln} - srednja logaritamska razlika temperatura. Srednja logaritamska razlika temperatura se definiše jednačinom:

$$\Delta T_{ln} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\ln \frac{\theta_2}{\theta_1}} \quad (2.20)$$

Potrebno je napomenuti da ΔT_{ln} funkcija može dovesti do numeričkih poteškoća, kada su temperaturne razlike θ_1, θ_2 na oboj kraja iste. Numeričke poteškoće mogu se preduprediti upotrebom aproksimacije Chena (1987.) tako da se ΔT_{ln} definiše izrazom [71]:

$$\Delta T_{ln} \cong \left[\frac{\theta_1 \theta_2 (\theta_2 + \theta_1)}{2} \right]^{1/3} \quad (2.21)$$

Sada se funkcija cilja za minimalne investicione troškove definiše na sledeći način:

$$\min C_{it} = C_{it1} \left[\frac{Q_{11}}{K_{11} \left[\frac{q_1^1 q_2^1 (q_1^1 + q_2^1)}{2} \right]^{\frac{1}{3}}} \right]^b + C_{it2} \left[\frac{Q_{12}}{K_{12} \left[\frac{q_1^2 q_2^2 (q_1^2 + q_2^2)}{2} \right]^{\frac{1}{3}}} \right]^b \quad (2.22)$$

gde su: K_{11} , K_{12} - ukupni koeficijenti prolaza toplote za dva razmenjivača, a C_{it1} i C_{it2} - investicioni troškovi za dva razmenjivača toplote.

Prikazana strategija za automatsko projektovanje mreža razmenjivača toplote primenjena je u kompjuterskom programu MAGNETS.

2.4.2 Simultano projektovanje mreža razmenjivača toplote

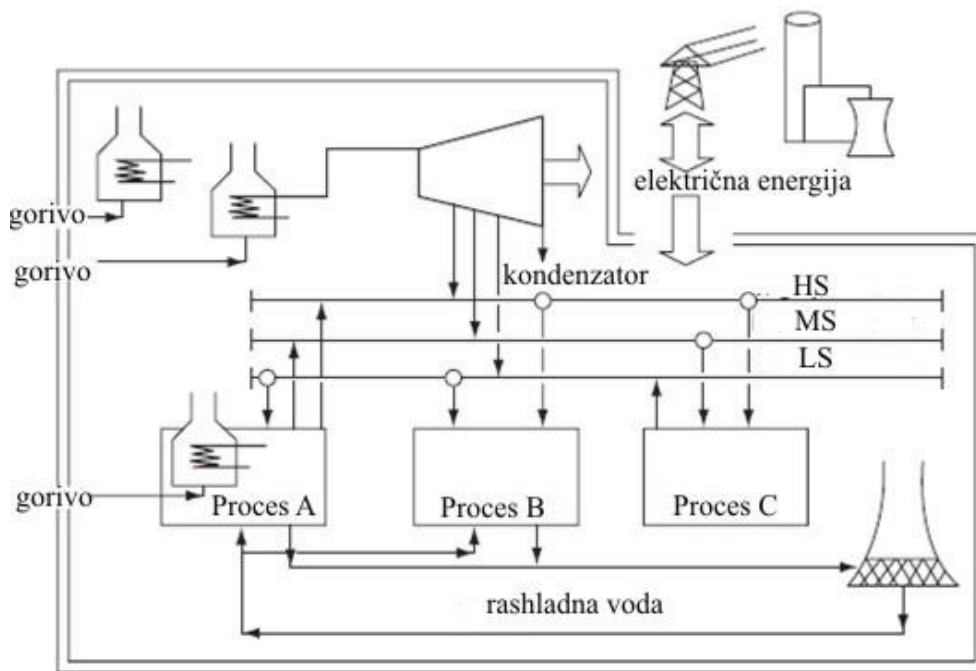
Cilj simultanog projektovanje mreža razmenjivača toplote je da se pronađe optimalna mreža bez rastavljanja problema na podprobleme. Autori Floudas i Ciric [75] su razvili simultani par - mreža hiperstrukturni model za optimizaciju svih kapitalnih troškova mreže razmenjivača toplote. Rešavanjem ovog optimizacionog problem određuje se minimalna cena razmenjivača toplote i površina za toplotnu razmenu. Nedostatak ove formulacije je što vrednost minimalne razlike temperature mora unapred biti specificirana. Yee i autori [56,70] predstavili su svoju metodu za simultano rešavanje mreže razmenjivača toplote koji se takođe bazira na superstrukтури, pri čemu je uveden niz aproksimacija kako bi se smanjilo računsko vreme.

2.4.3 Poređenje sekvencijalnog i simultanog pristupa za projektovanje mreže razmenjivača toplote

Glavna prednost sekvencijalnog pristupa je što korisnik može uticati na projektovanje mreže kroz rešavanje pojedinačnih koraka: kao što su minimalni zahtevi za grejanjem i hlađenjem, minimalni broj uređaja i projektovanje mreže sa minimalnim investicionim troškovima. Sa druge strane, prednost simultanog pristupa je što se projektovanje mreže odvija bez razdvajanje na podprobleme, tako da postoji veća mogućnost za određivanje bolje konfiguracije mreža razmenjivača toplote.

2.5 Metode za energetska integraciju postrojenja

U prethodnim tačkama su razmatrane metode za energetska integraciju pojedinačnih procesa u okviru postrojenja. U ovom delu će biti prikazan pregled metode za energetska integraciju skupa procesa koji su grupisani u jedno postrojenje. Mehanička, električna i toplotna energija potrebna za odvijanje procesa dobija se sagoravanjem fosilnih goriva u sistemu pomoćnih struja – energani. Šematski prikaz postrojenja dat je na slici 2.20.

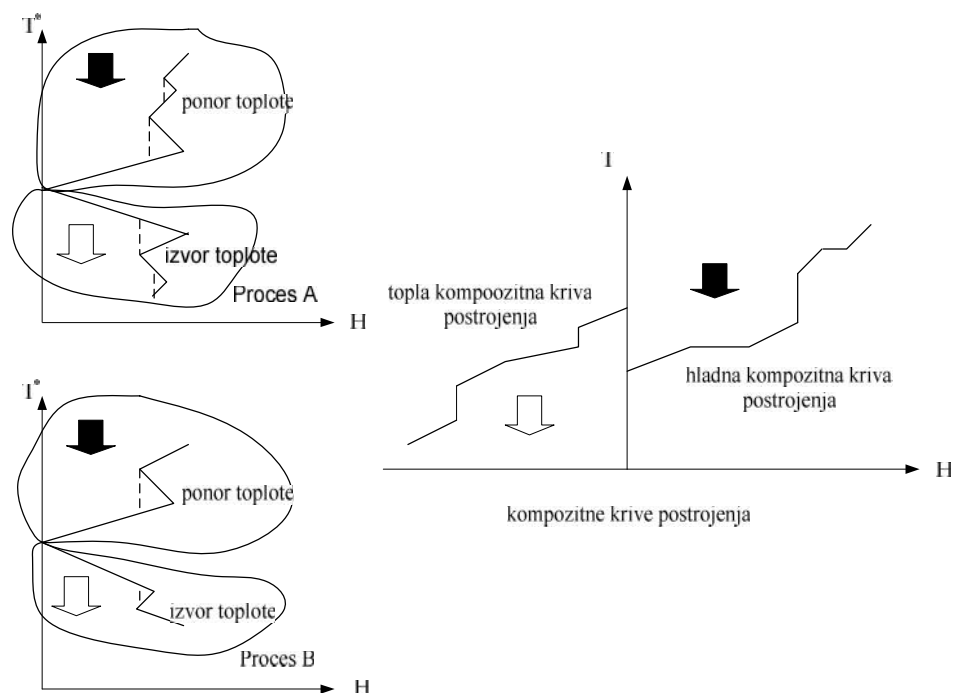


Slika 2.20 Šematski prikaz postrojenja

Gorivo se sagoreva u kotlovima pri čemu se proizvodi vodena para visokog pritiska. Nastala vodena para se propušta kroz turbine u cilju proizvodnje električne energije i pomoćnih struja različitog kvaliteta. Na Slici 2.20 su prikazane tri pomoćne struje različitog kvaliteta, i to vodena para visokog pritiska (HS), vodena para srednjeg pritiska (MS) i vodena para niskog pritiska (LS). Generisane pomoćne struje se dopremaju procesima na dalje korišćenje. Pored energana, i procesi mogu generisati vodenu paru tokom odvijanja procesa. Na primer, proces A koristi LS iz sistema pomoćnih struja postrojenja, a vraća HS i MS (Slika 2.20). Proces B koristi pomoćne struje LS, MS, HS iz sistema pomoćnih struja, a proces C koristi pomoćne struje MS i HS, a generiše LS.

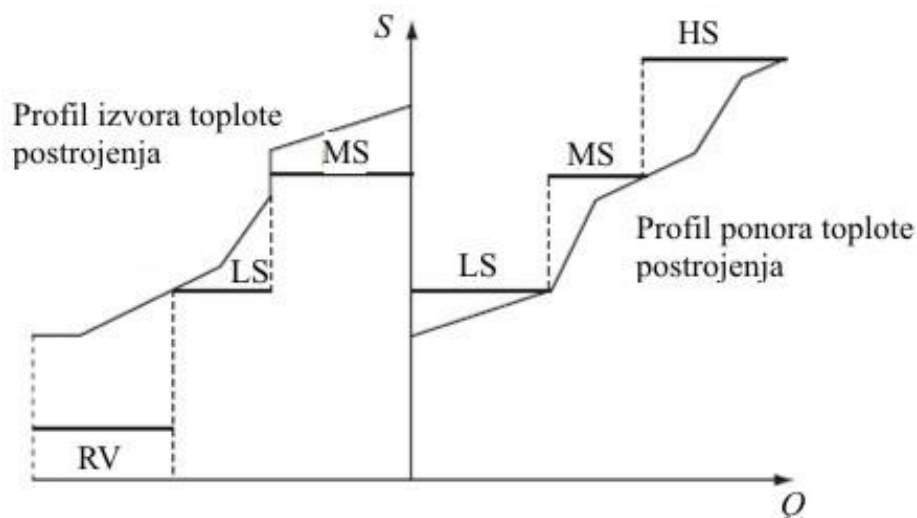
S obzirom da postoji niz praktičnih razloga zbog kojih nije moguće direktno povezati procesne struje iz različitih procesa upotrebom razmenjivača toplote, došlo je do potrebe za metodom koja bi omogućila indirektno povezivanje procesa. Metoda za energetske integracije postrojenja razvijena je početkom 90-tih na Institutu za nauku i tehnologiju, Univerziteta u Mančesteru (UMIST) [58]. Osnovni koncept na kome je zasnovana metoda za integraciju postrojenja zasniva se na indirektnom povezivanju procesa u okviru postrojenja preko sistema pomoćnih struja. Višak toplote u jednom od procesa proizvodi pomoćnu struju koja se preko već postojeće mreže cevovoda pomoćnih struja prenosi i upotrebljava za grejanje procesne struje u drugom procesu. Kao u slučaju integracije procesa i metoda za integraciju postrojenja zasnovana je na kompozitnim krivama, s tim da je metod konstrukcije kompozitnih krivih različit.

Ukupni zahtevi za grejanjem i hlađenjem za svaki od procesa u postrojenju mogu se odrediti preko ukupne kompozitne krive ili metode temperaturnih intervala. Na Slici 2.21 predstavljena su dva nezavisna procesa A i B, pomoću kojih će se objasniti dobijanje tople i hladne kompozitne krive postrojenja. Kod ukupnih kompozitnih krivih delovi procesa koji se nalaze iznad temperature "Pincha" se ponašaju kao ponori toplote. Kombinovanjem ukupnih zahteva za toplotom svih procesa u postrojenju iznad "Pincha", kod ukupnih kompozitnih krivih, dobija se temperaturno – entalpijski profil ukupnih zahteva postrojenja za toplotom. Temperaturno – entalpijski profil ponora toplote postrojenja, hladna kompozitna kriva postrojenja, ilustrovan je Slici 2.21 [77]. S druge strane, delovi procesa koji se nalaze ispod "Pincha", kod ukupne kompozitne krive, predstavljaju izvor toplote. Sada se kao u slučaju ponora toplote kombinovanjem potreba za hlađenjem ispod "Pincha" ukupne kompozitne krive procesa A i B, dobija temperaturno – entalpijski profil viška toplote u postrojenju, koji je ilustrovan toplom kompozitnom krivom koja predstavlja izvor toplote postrojenja na Slici 2.21. Osenčeni delovi kod procesa A i B, predstavljaju džepove povraćaja toplote, odnosno u tim delovima ukupne kompozitne krive može doći do razmene toplote između pojedinih procesa, bez neophodne potrebe za pomoćnim strujama. Više o konstrukciji kompozitnih krivih nalazi se u publikacijama Smith (2005.) [78].



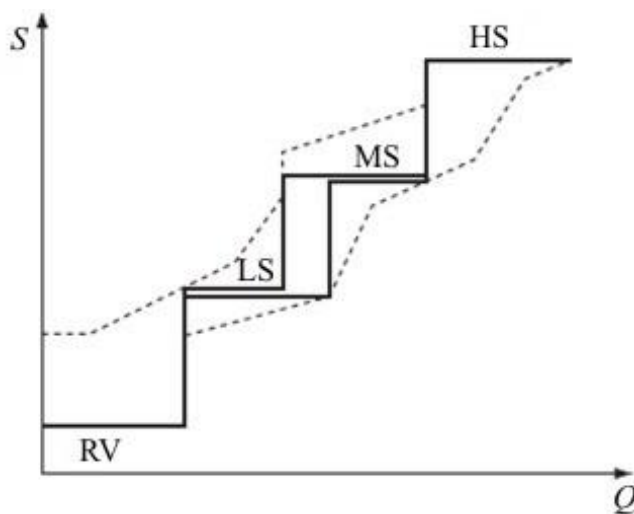
Slika 2.21 Kompozitne krive za izvor i ponor toplote u postrojenju

Nakon određivanja kompozitnih krivih postrojenja, pomoćne struje se mogu ucrtati u dijagram kompozitnih krivih postrojenja kao što je ilustrovano na Slici 2.22. Naime, na osnovu ove slike se uočava koje su pomoćne struje potrebne za funkcionisanje datog postrojenja. Sa Slike 2.22 se uočava da se pomoću izvora toplote postrojenja (topla kompozitna kriva postrojenja), može generisati vodena para srednjeg pritiska (MS) i niskog pritiska (LS), a preostali deo toplote se uklanja rashladnom vodom (RV). Ovakvo dobijene LS i MS vodene pare se mogu upotrebiti za grejanje procesa kojima je neophodna toplota negde u postrojenju, pomoću sistema pomoćnih struja. Takođe, Slika 2.22 ukazuje koji su neophodni zahtevi za pomoćnim strujama postrojenja, koje su neophodne za grejanje procesa postrojenja. Na osnovu profila ponora toplote postrojenja (hladna kompozitna kriva postrojenja) uočava se da su neophodne pomoćne struje: vodena para visokog pritiska (HS), srednjeg pritiska (MS) i niskog pritiska (LS).



Slika 2.22 Kompozitne krive postrojenja sa pomoćnim strujama

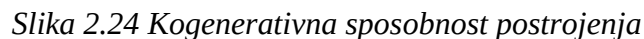
Pomeranjem kompozitne krive izvora toplote (topla kompozitna kriva postrojenja) i preklapanjem sa kompozitnom krivom ponora toplote (hladna kompozitna kriva postrojenja) moguće je utvrditi maksimalne uštede toplotne energije koja se ostvaruje integracijom postrojenja (Slika 2.23).



Slika 2.23 Određivanje ušteda preklapanjem kompozitnih krivih

Slika 2.23 ukazuje da se jedan deo MS i LS vodene pare izvora toplote postrojenja (topla kompozitna kriva) može upotrebiti za grejanje procesa ponora toplote (hladna kompozitna kriva) kojima je MS i LS vodena para neophodna. Onaj deo MS i LS vodene pare koji se nemože

Nakon određivanja kompozitnih krivih postrojenja, moguće je na jednostavan način odrediti količinu električne energije koja se može proizvesti propuštanjem vodene pare veoma visokog pritiska (VHS) kroz turbine, da bi se proizvele tople pomoćne struje određenog kvaliteta.



48

turbine služi zajedno sa toplotnim protokom između procesa i pomoćnih struja (označeno kao proizvedeno na Slici 2.24), za propuštanje HS kroz turbine i dobijanje MS. Ovo zapravo predstavlja toplotni protok u sistemu pomoćnih struja za dobijanje električne energije (drugi osenčeni pravougaonik na Slici 2.24). Zatim vodena para MS, koja je jednim delom dobijena propuštanjem HS kroz turbine, a drugim delom pomoću viška toplote tople kompozitne krive postrojenja, služi za zagrevanje procesa i dobija se vodena para IP (kvalitet vodene pare između LS i MS). IP vodena para dalje jednim delom služi za zagrevanje procesa, a drugim delom se propušta kroz turbine i dobija se vodena para LS. Jedan deo vodene pare LS dobijen je na ovaj način, a drugi deo LS je dobijen pomoću toplote tople kompozitne krive. Na kraju se jedan deo vodene pare LS propušta kroz turbinu do vakum uslova (VP), a drugi deo služi za grejanje procesa. Rashladna voda (RV) služi za hlađenje vodene pare na vakuum uslovima.

U slučaju prikazanom na Slici 2.24 maksimizovana je ušteda toplote u postrojenju. Prenosom toplote između procesnih struja sa viškom toplote i pomoćnih struja generiše se vodena para. Predajom toplote generisane pomoćne struje procesnoj struji sa manjkom toplote dolazi do utroška vodene pare. Onaj deo toplote koji se ne može kompenzovati upotrebom energetske integracije postrojenja potrebno je obezbediti iz spoljašnjeg izvora toplote. U ovom slučaju taj deo toplote se doprema vodnom parom VHS koja se generiše u kotlovima sagorevanjem fosilnih goriva. U delu iznad "Pincha" (Slika 2.24), vodena para VHS propušta se kroz parne turbine do vodene pare HS, a vodena para HS ekspanduje kroz parne turbine do vodene pare MS. Jedan deo vodene pare se ekspanduje kroz turbine, a drugi deo vodene pare služi za zagrevanje procesa. Pri propuštanju vodene pare kroz parne turbine generiše se električna energija koja se dalje može upotrebiti u postrojenju. U delu ispod "Pincha" ekspanduje vodena para LS do vodene pare VP. Pri ovom ekspandovanju takođe se generiše električna energija. Na Slici 2.24 prikazan je sistem koji ima maksimalan povraćaj toplote, odnosno minimalnu upotrebu goriva u kotlovima, što ne mora biti i najoptimalnije rešenje. Ukoliko ne bi imali maksimalnu uštedu toplote, imali bi veću potrošnju goriva u kotlovima, ali i veću mogućnost za proizvodnju električne energije. Neophodno je odabrati takvo rešenje koje omogućava najveću isplativost???. Ponekad je bolje generisati električnu energiju u postrojenju nego je uzimati iz spoljašnje mreže električne energije. Treba uzeti u obzir da može doći i do prekida dopremanja električne energije od spoljašnjeg izvora, tako da je uvek potrebno imati takav sistem koji može samostalno da funkcioniše.

2.6 Optimizacioni algoritmi

Svetska ekonomska kretanja usmerena su u pravcu globalizaciji trgovine, povećane konkurentnosti i održivog razvoja. Da bi se prilagodili navedenim ekonomskim pravcima privredni subjekti treba da koriste sirovine, energiju i prirodne resurse na što efikasniji način. Iz tog razloga projektovanje i integracija procesa predstavljaju jednu od najznačajnijih oblasti u hemijskom inženjerstvu. Moguće je razmatrati integraciju procesnih jedinica, materijala, energije u hemijskom postrojenju, kao i integraciju hemijskog postrojenja u mrežu proizvodnih procesa u cilju najefikasnije upotrebe sirovina, energije i prirodnih resursa.

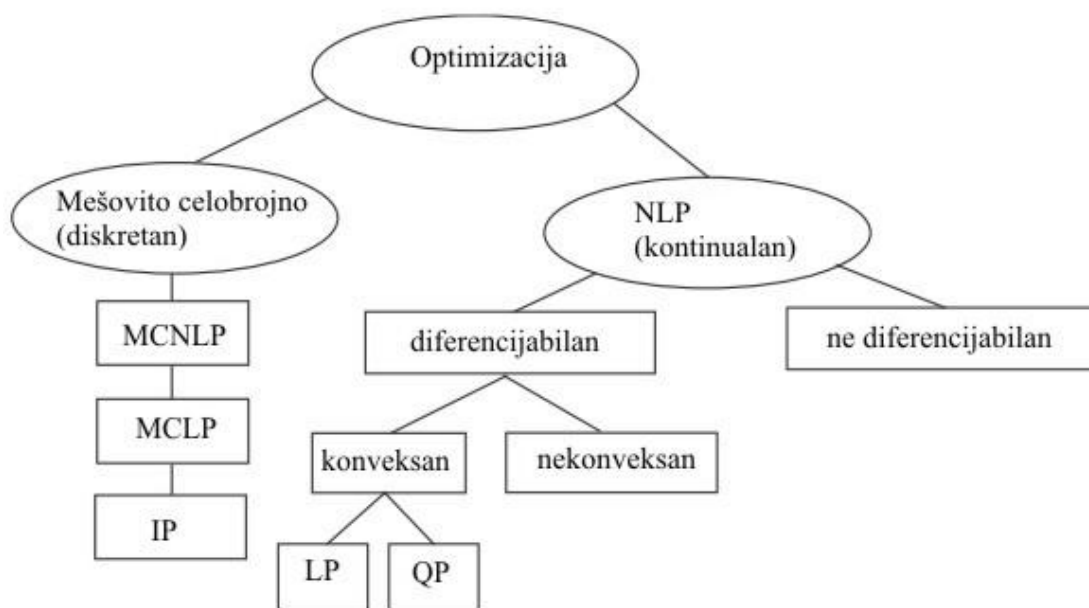
U poslednje tri decenije postignut je značajan napredak u oblasti razvoja metoda za integraciju, projektovanje i optimizaciju procesnih sistema. Razvijene metode bazirane su narazličitim konceptima: (i) heurističkim (intuicija, iskustvo), (ii) termodinamičkim (prirodni zakoni) i (iii) matematičkim (optimizacija). Heuristički koncepti se sve manje koriste jer ih sve više zamenjuju efikasne optimizacione metode, strategije i algoritmi, koje omogućavaju da se reši veliki broj složenih problema[80].

Pre razmatranja optimizacije kao strategije, potrebno je uvesti definicije za termine koji se koriste u optimizacionim studijama: matematičko programiranje (optimizacija) i optimizacioni problem. Matematičko programiranje ili optimizacija u hemijskom inženjerstvu može se definisati kao strategija određivanja vrednosti nezavisno promenljivih parametara procesa sa ciljem poboljšanja osobina posmatranog sistema. Iz definicije optimizacije prozilazi da je zadatak optimizacije da se za dati sistem nađu vrednosti nezavisno promenljivih parametara procesa u okviru zadatih ograničenja, kojim se postiže minimizovanje ili maksimizovanje razmatranog efekta [80]. Optimizacioni problem se definiše kao skup jednačina kojima je algebarski opisan procesni sistem i cilj koji se želi postići. Optimizacioni problem se sastoji iz više elemenata i to su: (i) funkcija cilja, (ii) prediktivni model posmatranog sistema, i (iii) nezavisne promenjive.

Funkcija cilja je algebarski izraz kojim se određuje skalarna vrednost kojom se kvantitativno određuje osobina sistema (profit, količina proizvoda, kapitalni troškovi, itd.). Prediktivni model posmatranog sistema je skup algebarskih izraza kojima se kvantitativno opisuje ponašanje sistema za različite vrednosti nezavisno promenljivih. U optimizacionom problemu prediktivni model je određen skupom jednačina i nejednačina, koje još nazivamo ograničenjima. Nezavisno

promenljive koje se javljaju u prediktivnom modelu moraju biti podešene tako da zadovoljavaju jednačine kojima su definisana ograničenja procesnog sistema. Nezavisno promenljive procesnog sistema su fizičke veličine uz pomoć kojih je definisan prediktivni model i koje se mogu nezavisno menjati u sistemu (npr. temperatura na ulazu u sistem, maseni protok na ulazu u sistem, dužina rekatora itd.) [80]. Nezavisne promenljive sistema još nazivamo stepeni slobode.

Optimizacija je osnovna i često primenjena procedura za veliki broj inženjerskih aktivnosti. Međutim, u mnogim slučajevima, optimizacija se odvija procedurom probe i greške. Da bi se izbegla ova vremenski zahtevna procedura, utvrđen je sistematski pristup koji omogućava da se nađu bolja rešenja. Slika 2.25, ilustruje tipove optimizacionih problema koji se najčešće javljaju u hemijskom inženjerstvu. Uopšteno optimizacioni problemi se mogu klasifikovati prema vrsti nezavisnih promenljivih na probleme sa kontinulnim i/ili diskretnim promenljivim [80].



Slika 2.25 Tipovi optimizacionih problema koji se najčešće javljaju u hemijskom inženjerstvu

Uopštena algebarska forma optimizacionog problema koja odgovara slici 2.26 može se definisati sledećom jednačinom [80]:

$$\begin{aligned}
& \min_{x,y} f(x,y) \\
& \text{sa ograničenjima} \\
& h(x,z) = 0 \\
& g(x,z) \leq 0 \\
& x \in R^n, y \in \{0,1\}^t
\end{aligned} \tag{2.25}$$

gde su: $f(x)$ - funkcija cilja, $h(x,y)$ – jednačine kojima je opisan prediktivni model, $g(x,y)$ - nejednačine koje opisuju specifikacije koje sistem mora da zadovolji (npr. koncentracija proizvoda na kraju procesa mora da bude veća od 10 g/l), vektor n - kontinulane promenjive i vektor t - diskrtene promenjive.

Opšti optimizacioni problem definisan jednačinom (2.25) može se svesti na nekoliko podvrsta: linerani, nelinearni, mešovito celobrojno linerani i mešovito celobrojno nelinearni.

Kod lineranih optimizacionih problema (LP) funkcija cilja, ograničenja jednakosti i nejednakosti su linerani algebarski izrazi. Za ovu vrstu optimizacionih problema razvijen je veliki broj algoritama od kojih su najznačajniji i najčešće korišćeni sledeći algoritmi “Simplex”, “Interior point”, i “Karmakov” [81].

Mešovito celobrojno linerani optimizacioni problemi (MCLP) su po definiciji identični lineranim optimizacionim problemima, s tom razlikom da su jedna ili više nezavisnih promenljivih diskretne promenjive, tj. celobrojne promenjive. Najčešće korišćeni algoritmi za ovu vrstu optimizacionih problema su: “Branch and Bound”, “Cutting plane”, metoda dekompozicije, i “logic-based” [82].

Za nelinearni optimizacioni problema (NLP) karakteristično je da je problem nelinearan ako je bar jedan od algebarskih izraza kojim su definisani funkcija cilja ili ograničenja nelinearan. Razvijen je veliki broj algoritama za rešavanje ove vrste problema. Algoritme možemo podeliti prema načinu određivanja pravca pretrage na gradijentne i stohastičke. Kod gradijentnih metode pravac pretrage određuju se upotrebom prvog (“Jacobian” matica) i/ili viših izvoda (“Hessian” matrica) optimizacione funkcije. Najčešće korišćeni algoritmi za nelinearne optimizacije problem sa ograničenjima u procesnom inženjerstvu su: metoda redukovanih gradijenata i sukcesivno kvadratno programiranje [80]. U slučaju stohastičkih metoda pravac pretrage se određuje upotrebom slučajno generisanih vrednosti ili statističkih funkcija. Najčešće korišćene metode su:

“Monte Carlo”, “Simulated annealing”, “Genetic algorithm”, “Tabu search”, “Ant colony” itd [81].

Mešovito celobrojno nelinearni optimizacioni problemi (MCNLP) su slični po definiciji sa nelinearnim optimizacionim problemima s tom razlikom da su jedna ili više nezavisnih promenljivih diskretne promenjive, tj. celobrojne promenjive. Najčešće korišćene metode za ovu vrstu optimizacionih problema su: “Outer Approximation with Equality Relaxation”, “Generalized Outer Approximation”, “Generalized Cross Decomposition” itd [81].

Algoritmi za rešavanje LP, MILP, NLP i MINLP optimizacionih problema dostupni su u okviru nekoliko programskih paketa kao što su: AMPL [83], GAMS [84], LINGO [85], What’s the Best [86], Tomlab [87] itd.

3. Razvoj metode za energetske integracije postrojenja u industrijskim kompleksima

Brzi i efikasni odgovori na klimatske promene zahtevaju velike globalne socio-ekonomske promene, zbog njihovog uticaja na ekosisteme i društvo [88-90]. Oko 60% ukupne emisije gasova koji izazivaju efekat staklene bašte potiče od sagorevanja fosilnih goriva [91-93]. Način na koji se kompanije ponašaju prema propisima o zaštiti životne okoline, imaju značajan uticaj na njihovu održivost i profitabilnost [94-97]. Eksponencijalni porast populacije, industrijalizacija, povećanje životnog standarda, smanjenje prirodnih resursa, potrošnja neobnovljivih resursa, globalne klimatske promene i povećan rizik za opstanak ekosistema, ukazuju da je u cilju očuvanja planete potrebno krenuti u smeru održivog razvoja društva. Pojam održivi razvoj je veoma složen, jer obuhvata veliki broj socijanih, ekonomskih i ekoloških aspekata koji utiču na društvenu zajednicu, kako na mikro tako i na makro nivou. Najčešće korišćena definicija održivog razvoja data je u “Brundtland Report” gde je održivi razvoj definisan kao “zadovoljavanje potreba današnje generacije bez ugrožavanja mogućnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe” [98]. Elkington definiše tri osnovna principa na kojima se zasniva koncept održivog razvoja [99]. Prema Elkingtonu osnovni principi su: ekonomski rast, zaštita životne sredine i socijalna jednakost [99]. Veliki broj konsultanskih kompanija kao što su Deloitte, McKinsey, Goldman & Sachs kao ključne prioritete privrednih subjekata ističu: očuvanje životne sredine, očuvanje resursa, povećanje proizvodnje i povećanje profitabilnosti, što je u skladu sa Elkington-ovim osnovnim principima [100-103]. Smernice održivog razvoja usmeravaju privredne subjekte na korišćenje novih tehnologija i u pravcu većeg stepena integracije. Prvo se za integraciju procesa koristila “Pinch” tehnologija, a zatim su se koristile metode za integraciju postrojenja. Metod energetske integracije postrojenja je razvijen od velikog broja autora [104-117]. Sledeći logičan korak je bila energetska integracija određenog broja postrojenja smeštenih u industrijskim kompleksima. Cilj integracije privrednih subjekata je stvaranje industrijskih kompleksa u kojim bi se minimizovala upotreba svih oblika resursa kao što su: informacije, sirovine, voda, energija, infrastruktura i prirodni resursi. Industrijski kompleksi koji zadovoljavaju uslov minimizovanja upotrebe resursa nazivaju se još i industrijski parkovi ili kompleksi čistije proizvodnje [118]. Povećanje energetske efikasnosti u industrijskom

kompleksu je osnovni preduslov za očuvanje prirodnih resursa fosilnih goriva. Energetska efikasnost se može povećati uvođenjem novih energetske manje intenzivnih tehnologija i uspostavljanjem energetske integracije između privrednih subjekata u okviru industrijskog kompleksa. Stijepović i autori pokazali su da uvođenje novih tehnologija značajno može povećati efikasnost procesa [119]. Da bi se energetska efikasnost povećavala integrisanjem privrednih subjekata potrebno je dati odgovore na pitanja kao što su: na koji način integrisati privredne subjekte, koje privredne subjekte treba međusobno povezati i koji su kriterijumi za uspostavljanje veze između postrojenja.

Univerzalne odgovore na ova pitanja nemoguće je dati, jer oni zavise od slučaja do slučaja. Iz tog razloga potrebno je uspostaviti metodu čijom primenom dobijamo odgovore na navedena pitanja, posebno za svaki od slučaja.

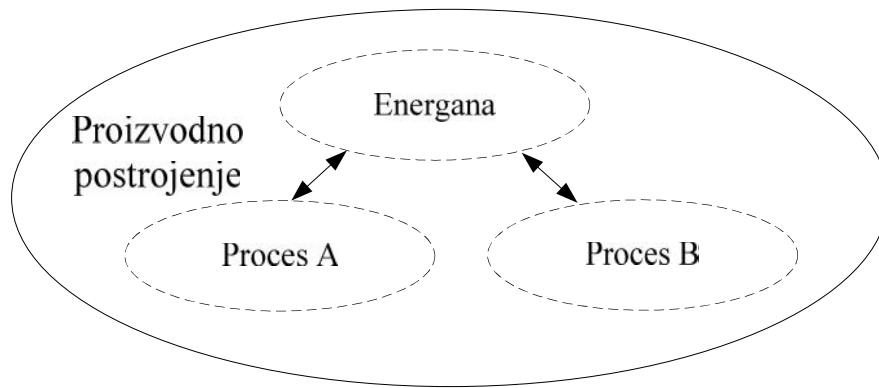
U teorijskom delu disertacije prikazane su do sada razvijene metode za energetske integraciju. Navedene metode mogu se primeniti samo za integraciju pojedinačnih postrojenja ili procesa. Na osnovu ovih činjenica jasno je da se nameće potreba za novom metodom za energetske integraciju industrijskog kompleksa, koja će biti u mogućnosti da ostvari optimalnu integraciju između elemenata industrijskog kompleksa radi povećanja energetske efikasnosti.

3.1 Definisane problema

Pre razvoja metode, potrebno je definisati problem za koji se metoda formuliše. Pod definisanjem problema podrazumeva se jasna karakterizacija sistema i elemenata koji se u njemu posmatraju, definisanje početnih pretpostavki, ograničenja i ciljeva koji se žele postići.

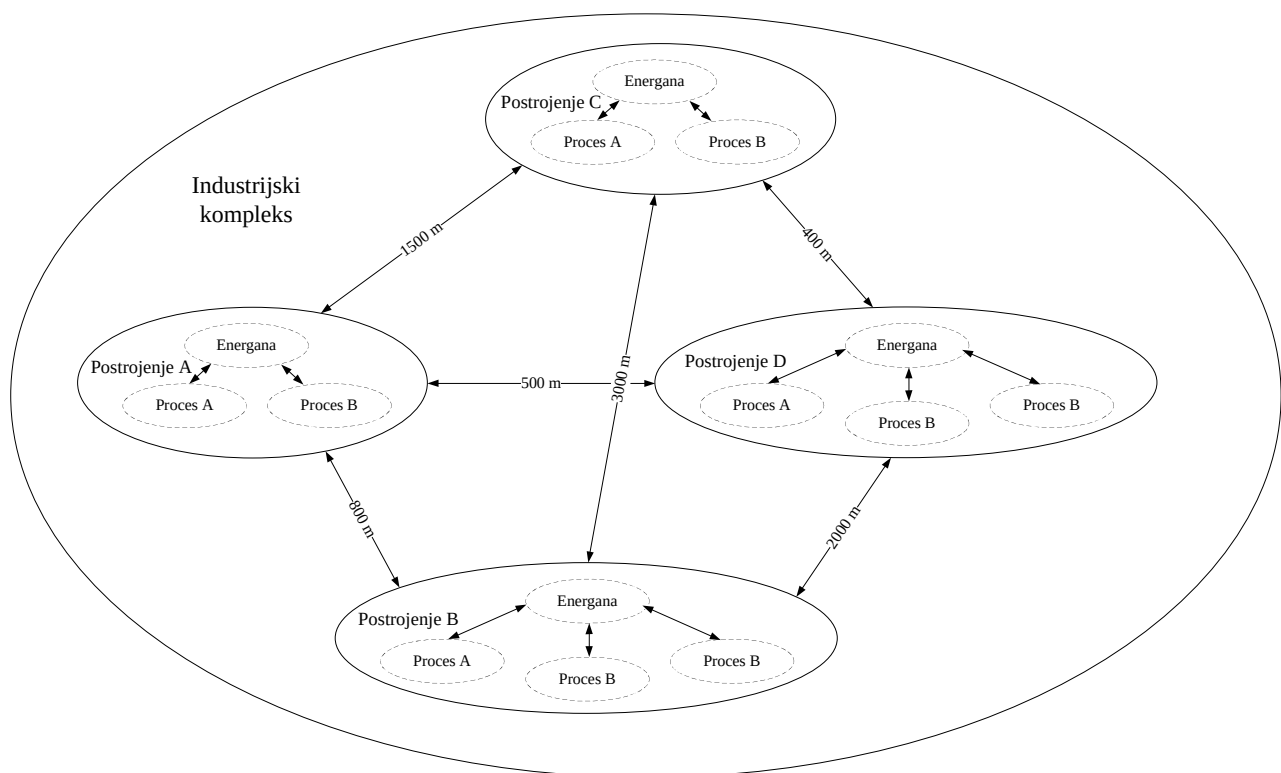
Definisanje problema omogućava da se posmatrani sistem matematički modeluje. U cilju definisanja problema neophodno je prvo definisati osnovne elemente sistema. Osnovni elementi sistema su:

- **Proces** - definiše se kao niz operacija koje prevode sirovine u proizvod. Za odvijanje procesa neophodno je obezbediti energiju u različitim oblicima (elektična, mehanička i termička).
- **Proizvodno postrojenje** - definisano je kao nezavisna proizvodna jedinica koja se sastoji od jednog ili više procesa (Slika 3.1). Nezavisnost podrazumeva da postrojenje poseduje svoju sopstvenu energiju koja obezbeđuje potrebnu energiju za odvijanje procesa.



Slika 3.1 Ilustracija proizvodnog postrojenja

- **Industrijski kompleks** je definisan kao skup proizvodnih postrojenja smeštenih u određenom administrativnom prostoru (Slika 3.2).



Slika 3.2 Ilustracija industrijskog kompleksa

Energetska integracija uslovljena je prirodnim zakonima, vlasničkim odnosima i fizičkim barijerama. Da bi se sagledala kompleksnost sistema, biće ilustrovano nekoliko osnovnih karakteristika industrijskih kompleksa. U industrijskom kompleksu, različita proizvodna postrojenja mogu biti u vlasništvu različitih kompanija i/ili akcionara. Dogovor između rukovodstava oko načina integracije i kompenzacije za isporučenu energiju može imati značajan uticaj na izgled integracione mreže. Glavni prioritet za vlasnike i rukovodstvo proizvodnog postrojenja je sigurnost i pouzdanost rada procesa i maksimalno iskorišćenje kapitalnih investicija. Integracija ne bi trebalo da poveća rizik vezan za pouzdanost i sigurnost rada, ali bi sa druge strane trebalo da omogući da svi učesnici ostvare profit. Trebalo bi i uzeti u obzir sezonske promene u radu proizvodnih postrojenja, s obzirom da potencijal za uštedu energije može značajno da odstupa u zavisnosti od godišnjeg doba. Postoji mogućnost i vanrednog zaustavljanja rada u jednom od integrisanih postrojenja koje ima višak energije, što bi u slučaju integracije privremeno eliminisalo snabdevanje energijom ostalih integrisanih postrojenja, a time i do zaustavljanja proizvodnje. Rastojanja između postrojenja mogu biti velika, što bi u slučaju direktne integracije postrojenja uslovljelo velike gubitke toplote, kao i pritiska tokom transporta. Integracija proizvodnih postrojenja ne bi trebalo da degradira pouzdanost, sposobnost kontrole i fleksibilnost svakog od proizvodnih postrojenja povezanih u energetska-integracionu mrežu. Zato nije preporučljivo da se izgradi sistem sa kompleksnim direktnim ili indirektnim povezivanjem. Izvodljivost energetske integracije mora biti pažljivo procenjena sa aspekta energetskih gubitaka i kapitalnih troškova.

Na osnovu navedenih razmatranja, problem se definiše kao zahtev za uspostavljanje energetske integracije između postrojenja u okviru industrijskog kompleksa, a u cilju očuvanja energetskih resursa i povećanja profitabilnosti. Industrijski kompleks se sastoji od više procesa koji su grupisani u proizvodna postrojenja. Svako od proizvodnih postrojenja poseduje sopstvenu energiju koja obezbeđuje toplotnu, mehaničku i električnu energiju za odvijanje procesa. Standardni industrijski kompleks sa četiri nezavisna proizvodna postrojenja prikazan je na Slici (3.3). Na slici (3.3) se vide koridori koji su neophodni za razmenu energije između postrojenja, kao i postrojenja u okviru industrijskog kompleksa i njihove energane.

U cilju definisanja problema uvedeni su sledeći parametri [120]:

$P = \{p\}$, skup proizvodnih postrojenja u okviru industrijske zone

$J_p = \{j\}$, skup procesnih struja u postrojenju p koje odbacuje višak toplote u hladne pomoćne struje

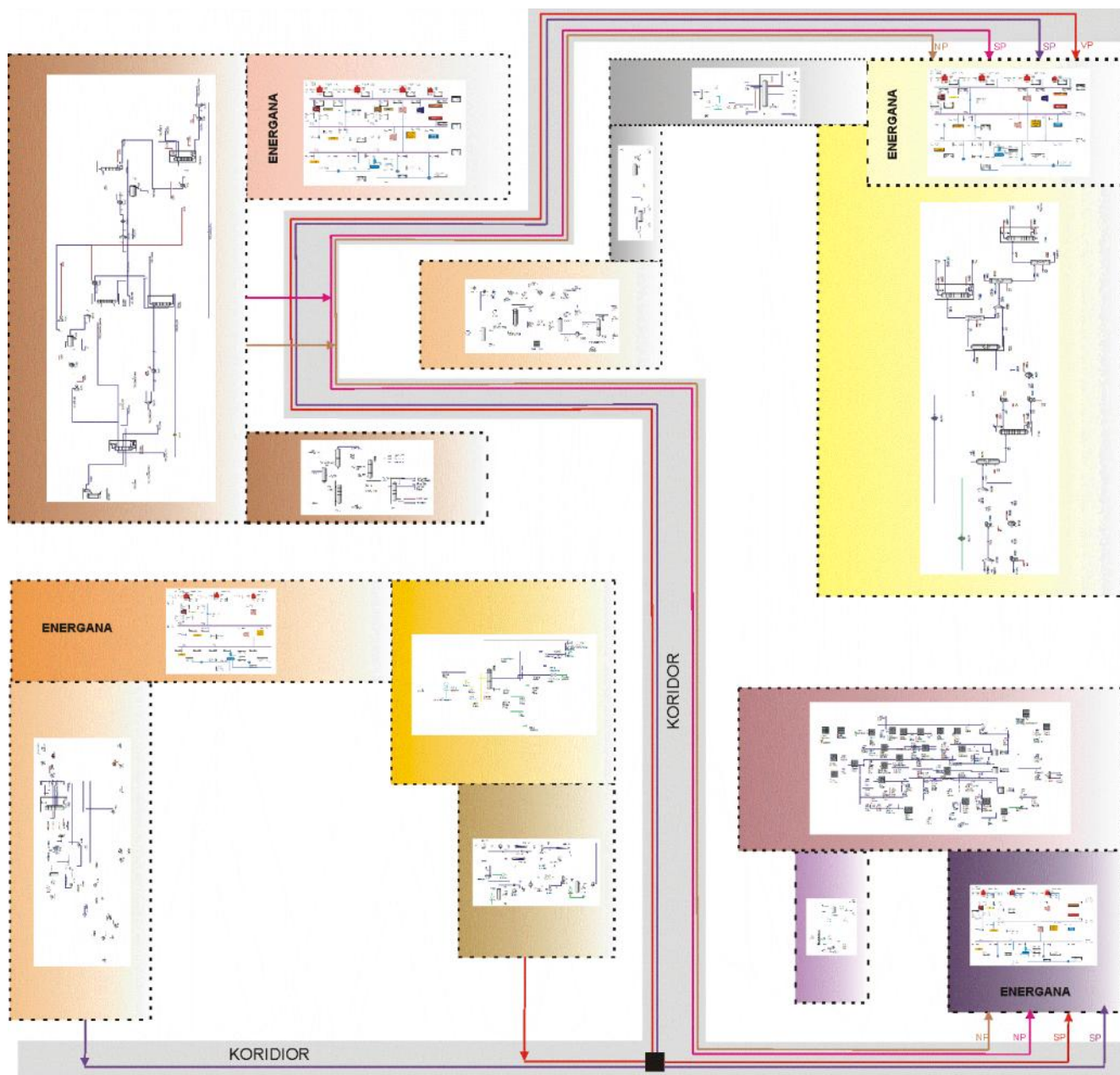
$L_p = \{l\}$, skup pomoćnih struja u postrojenju p

$P^I = \{i / i \in P, J_i \neq \emptyset\}$, skup postrojenja koja su izvor toplote

$P^K = \{k / k \in P, L_k \neq \emptyset\}$, skup postrojenja koja su ponor toplote

Postrojenja koja su u skupu izvora toplote su potencijalni izvoznici toplote, a postrojenja koja su u skupu ponora toplote su uvoznici toplote. Izvodljivost energetske integracije zavisi od kvaliteta i kvantiteta toplote koja se odbacuje u hladne pomoćne struje postrojenja izvora toplote, odnosno u okolinu. Od odbačene toplote moguće je generisati pomoćne struje koje treba da ispune određene zahteve za kvalitetom. Generisane pomoćne struje u vidu vodene pare ili toplog ulja se putem cevovoda kroz pristupne koridore transportuju u energane proizvodnih postrojenja, gde potpuno ili delimično zamenjuju pomoćne struje proizvedene u energanama tih postrojenja. Da bi energetska integracija u okviru industrijskog kompleksa bila izvodljiva, rešenja definisanog problema treba da zadovolje sledeće uslove:

1. Postojeća konfiguracija energana u svakom proizvodnom procesu treba da bude netaknuta da bi se održao predhodni nivo nezavisnosti, pouzdanosti i operativnost,
2. Toplota za energetska integraciju dobija se u delovima procesa gde se višak toplote odbacuje u pomoćne struje za hlađenje (vazduh, voda),
3. Od viška toplotne energije koja se odbacuje u pomoćne struje za hlađenje, proizvode se pomoćne struje koje se mogu prebaciti u sistem pomoćnih struja susednog proizvodnog postrojenja, da bi delimično ili potpuno zamenili pomoćne struje u integrisanom postrojenju,
4. Razmatra se samo energetska integracija između proizvodnih postrojenja.



Slika 3.3 Plan industrijskog kompleksa

3.2 Razvoj metode

U ovoj doktorskoj disertaciji predložena je sistematska metodologija za određivanje maksimalne energetske uštede i razvoj ekonomski optimalne mreže razmenjivača toplote i cevovoda, koji povezuju postrojenja izvora toplote sa postrojenjima ponora toplote.

Do sada razvijene metode za energetska integraciju sadrže dva osnovna koraka. U prvom koraku se određuje maksimalna moguća ušteda energije, ne ulazeći u detaljno projektovanje sistema. Ovaj korak omogućava da se odredi gornja granica uštede i ukazuje koliki je potencijal za uštedu energije. Na osnovu vrednosti potencijalne uštede energije može se odrediti da li je ušteda prihvatljiva, da bi se pristupilo koraku detaljnog projektovanja integracione mreže. Ukoliko je energetska integracija prihvatljiva u sledećem koraku projektuje se sistem na osnovu unapred definisane funkcije cilja [120].

Metoda koja je razvijena u ovoj doktorskoj disertaciji sadrži navedene karakteristične korake, ali je proširena i razvijena u cilju optimizacije sistema i poboljšanja stepena efikasnosti. Predložena metoda sastoji se iz pet osnovnih koraka:

- (1) prikupljanje i obrada podataka,
- (2) određivanje potencijala za uštedu energije,
- (3) određivanje izvodljivih integracionih opcija,
- (4) određivanje maksimalne uštede energije,
- (5) projektovanje optimalne mreže razmenjivača toplote i cevovoda.

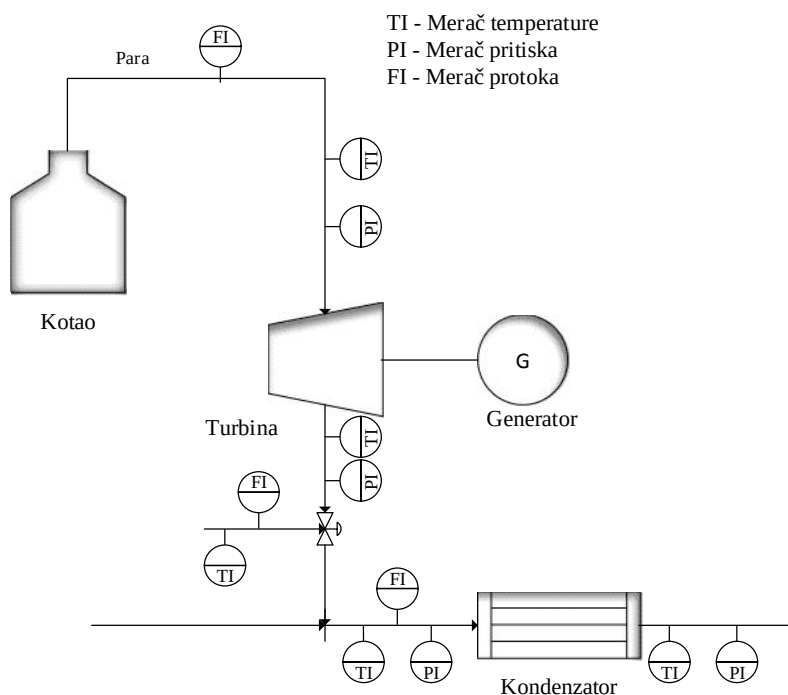
3.2.1 Prikupljanje i obrada podataka iz industrijskog kompleksa

Tačnost predloženog rešenja za uštedu energije zavisi od kvaliteta prikupljenih podataka. S toga je u ovom delu disertacije detaljno objašnjena vrsta neophodnih podataka, mesto i način na koji se oni prikupljaju. Podaci koje je potrebno prikupiti mogu se podeliti u četiri kategorije:

- 1) operativni podaci za sistem toplih pomoćnih struja,
- 2) operativni podaci za procesne struje i hladne pomoćne struje u razmenjivačima u kojima se uklanja višak toplote iz procesa,
- 3) radni podaci za turbine u različitim režimima rada,
- 4) podaci za rastojanja između postrojenja.

3.2.1.1 Operativni podaci sistema toplih pomoćnih struja

Za svaku od pomoćnih struja u energanama, koja se koristi za grejanje procesne struje ili koja se generiše da bi se upotrebila u procesu potrebno je prikupiti sledeće operativne podatke: maseni protok, pritisak, maksimalnu temperaturu i temperaturu zasićenja (vodena para). Šematski prikaz dela energane i podaci koje je potrebno prikupiti, dati su na Slici (3.4). Sa slike (3.4) se vidi da se vodena para vrlo visokog pritiska proizvodi u kotlu sagorevanjem goriva, a zatim se propušta kroz turbine gde se generiše električna energija, a na izlazu iz turbine dobija se vodena para određenog kvaliteta. Na određenim mestima postavljeni su merači za protok (FI), temperaturu (TI) i pritisak (PI), na osnovu kojih se dobijaju odgovarajući podaci o pomoćnim strujama.

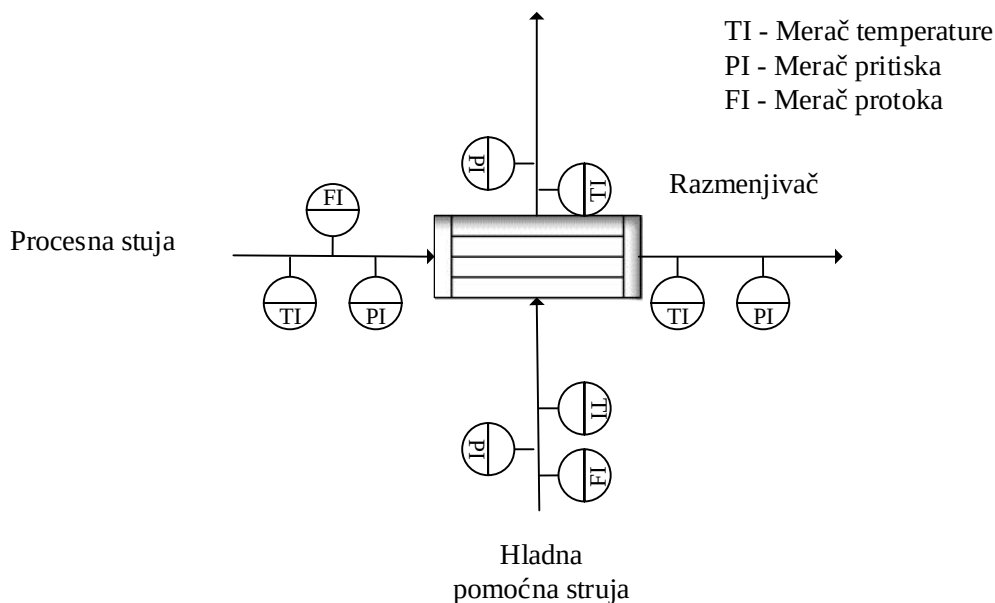


Slika 3.4. Šematski prikaz dela energane i podaci koje je potrebno prikupiti

3.2.1.2 Operativni podaci za procesne struje i hladne pomoćne struje u razmenjivačima u kojima se uklanja višak toplote iz procesa

Toplota koja se uklanja iz jednog od procesa u industrijskom kompleksu može se iskoristiti za grejanje drugog. Da bi odredili kvalitet toplote koja se odbacuje i mogućnost njene dalje upotrebe u drugom industrijskom postrojenju, neophodno je prikupiti podatke o masenim protocima struja

koje ulaze u razmenjivač, njihove temperature i pritiske (Slika 3.5), a u slučaju fazne transformacije tačku ključanja i tačku rose. Na slici (3.5) su prikazana mesta gde su postavljeni merači za protok (FI), temperature (TI) i pritisak (PI), na osnovu kojih se prikupljaju neophodni podaci.



Slika 3.5 Potrebni podaci za razmenjivač toplote topla procesna struja i hladna pomoćna struja

3.2.1.3 Podaci za turbine

Procesni parametri za turbine koje je neophodno prikupiti su: maseni protok vodene pare kroz turbinu, ulazni i izlazni pritisak i temperatura (Slika 3.4). Date procesne parametre potrebno je prikupiti za različite režime rada kako bi se što bolje modelovale performanse turbine. Modelovanje rada turbine biće prikazao i objašnjeno u poglavlju 4.3.

Specifični parametri turbine su: maksimalne i minimalne vrednosti masenog protoka, temperatura i pritisak na ulazu i izlazu iz turbine, kao i vrednosti proizvedene električne energije pri datim uslovima. Karakteristike datog uređaja se uglavnom prikupljaju iz dokumentacije priložene od strane proizvođača turbine.

3.2.1.4 Podaci za rastojanja između postrojenja

Prenos toplote iz postrojenja koja predstavljaju izvor toplote, do postrojenja koja predstavljaju ponor toplote, vrši se upotrebom pomoćnog medijuma. Tokom transporta deo energije se gubi

usled razmene toplote sa okolinom i usled pada pritiska. Količina gubitaka energije zavisi od rastojanja i debljine izolacije. Koridori predstavljaju trase kojima se pomoćne struje, proizvedene u jednom postrojenju (izvor toplote), prenose cevovodima ka energani drugog postrojenja (ponor toplote). Uspostavljanje sistema koridora neopodno je zbog održavanja sistema i sigurnosnih zahteva koji idustrijski kompleks treba da ispunjava. Ako koridori između određenih postrojenja ne postoje, potrebno je razmotriti da li postoje mogućnosti za njihovo uspostavljanje. Iz podataka o koridorima određuju se vrednosti rastojanja između postrojenja izvora i ponora toplote, koja služe za određivanje gubitaka toplote i pritiska pri prenosu.

3.2.2 Određivanje potencijala za uštedu energije

Višak toplote iz procesa uklanja se razmenom toplote između tople procesne struje i hladne pomoćne struje. U cilju određivanja potencijala za uštedu energije potrebno je proceniti kvalitet toplote koja se uklanja iz procesa. Tokom razmene toplote između procesne i rashladne pomoćne struje usled povećanja entropije dolazi do degradiranja kvaliteta toplotne energije. Stepem degradacije određuje se preko veličine stanja eksergija, čija promena omogućava da se odredi nepovratnost procesa, odnosno neiskorišćen potencijal toplote koja se uklanja iz procesa upotrebom hladne pomoćne struje. Promena eksergije je definisana sledećim izrazom:

$$\Delta Ex = \Delta H - T_0 \cdot \Delta S = H - H_1 - T_0 \cdot (S - S_1) \quad (3.18)$$

gde su: Ex - eksergija (kW), H - entalpija (kW), S - entropija (kW/K) i T_0 - standardna temperatura. Promena entropije za razmenu toplote na konstantnoj temperaturi definisana je drugim zakonom termodinamike:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (3.19)$$

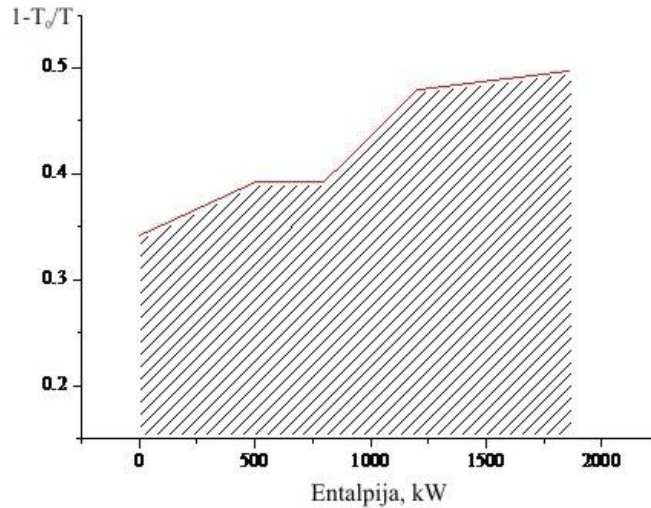
Zamenom jednačina (3.19) u (3.18) dobija se jednačina (3.20):

$$\Delta Ex = \Delta H - T_0 \frac{Q}{T} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \Delta H \quad (3.20)$$

gde su: Q - razmenjena toplota (kW), T - temperatura na kojoj se toplota razmenjuje (K).

Jednačina (3.20) definiše promenu eksergije pri toplotnoj razmeni na konstantnoj temperaturi. Pošto prilikom razmene toplote temperatura fluida nije konstantna, u analizu je neohodno uvesti

koncept eksergetskih kompozitnih krivih [121]. Na Slici (3.6) ilustrovana je eksergetska kompozitna kriva koja prikazuje promenu eksergije fluida tokom razmene toplote. Površina ispod krive prikazuje zavisnost $1-T_0/T$ od promene entalpije fluida i jednaka je promeni eksergije.



Slika 3.6. Eksergetska kompozitna kriva

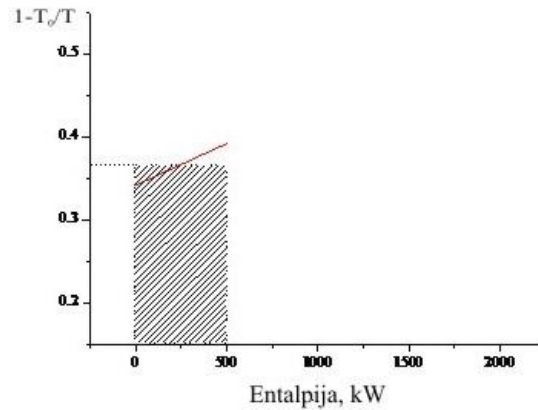
Promena eksergije se sada može definisati kao:

$$\Delta Ex = \int_{H_1}^{H_2} \left(1 - \frac{T_0}{T(H)} \right) dH \quad (3.21)$$

Eksergetska kompozitna kriva prikazana na Slici (3.6) može se podeliti na linearne segmente. Zavisnost u segmentu može se aproksimirati linearnom funkcijom, tako da se promena eksergije u datom segmenu može odrediti sledećom jednačinom:

$$\Delta Ex_i = \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}_i} \right) \cdot \Delta H_i \quad (3.22)$$

gde je $\bar{T}_i$ srednja temperatura u segmentu i , koja se jednaka aritmetičkoj sredini temperature na početku i na kraju segmenta (Slika 3.7).

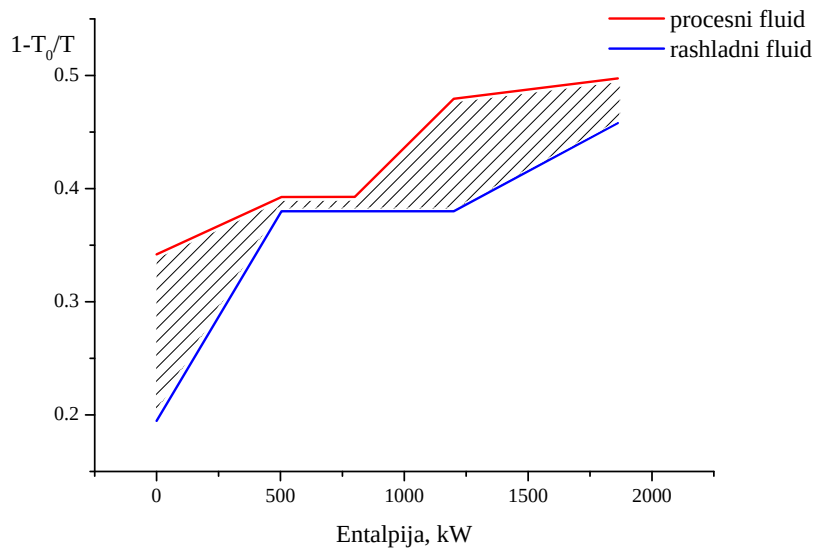


Slika 3.7 Srednja temperatura segmenta

Zbirom promena eksergija lineranih segmenata određuje se ukupna promena eksergije, koja se može definisati sledećom jednačinom:

$$\Delta E_x = \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) \cdot \Delta H_i \quad (3.23)$$

Eksergetske kompozitne krive za procesnu struju i rashladnu pomoćnu struju tokom razmene toplote prikazane su na Slici (3.8). Osenčeni deo između dve eksergetske kompozitne krive predstavlja gubitak eksergije tokom toplotne razmene.



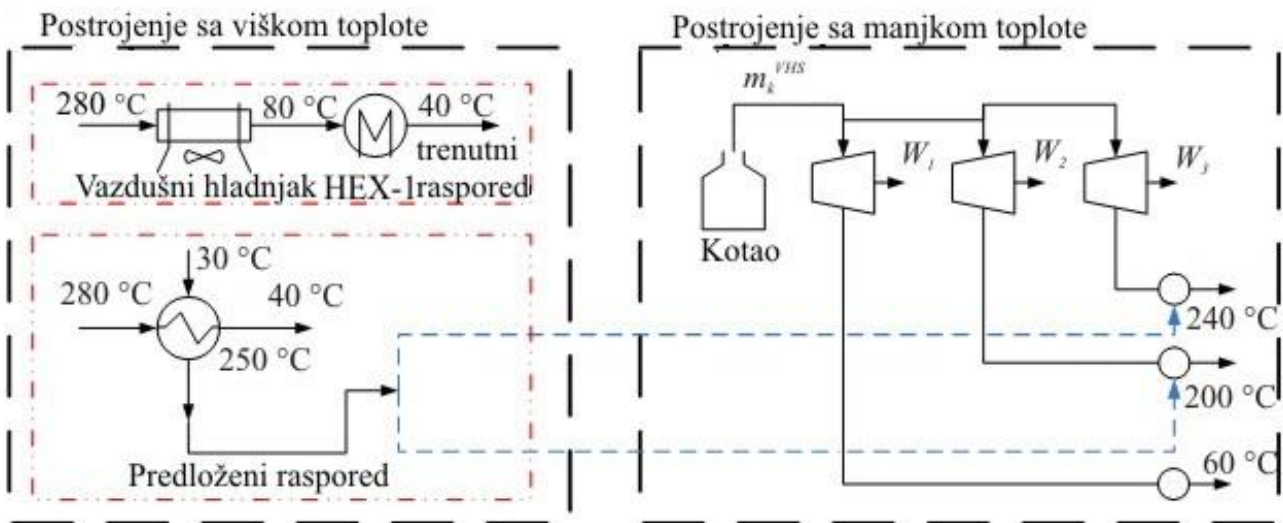
Slika 3.8 Eksergetske kompozitne krive u razmenjivaču toplote

Primenom jednačine (3.23) za toplu procesnu i hladnu pomoćnu struju, gubitak eksergije tokom toplotne razmene se može definisati kao:

$$\Delta Ex_{loss} = \Delta Ex^{pf} - \Delta Ex^{rf} = \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_{pfi}} \right) \cdot \Delta H_i - \sum_i \left(1 - \frac{T_0}{T_{rfi}} \right) \cdot \Delta H_i \quad (3.24)$$

gde je: ΔEx_{loss} - gubitak eksergije (kW), ΔEx^{pf} - promena eksergije procesnog fluida, ΔEx^{rf} – promena eksergije rashladnog fluida, T_{pf} – temperatura procesnog fluida, T_{rf} – temperatura rashladnog fluida.

Da bi se smanjio gubitak eksergije potrebno je zameniti postojeću hladnu pomoćnu struju novom pomoćnom strujom, koja se može upotrebiti kao topla pomoćna struja u nekom od postrojenja u industrijskom kompleksu, na način ilustrovan na Slici (3.9).



Slika 3.9 Uspostavljanje veze između postrojenja

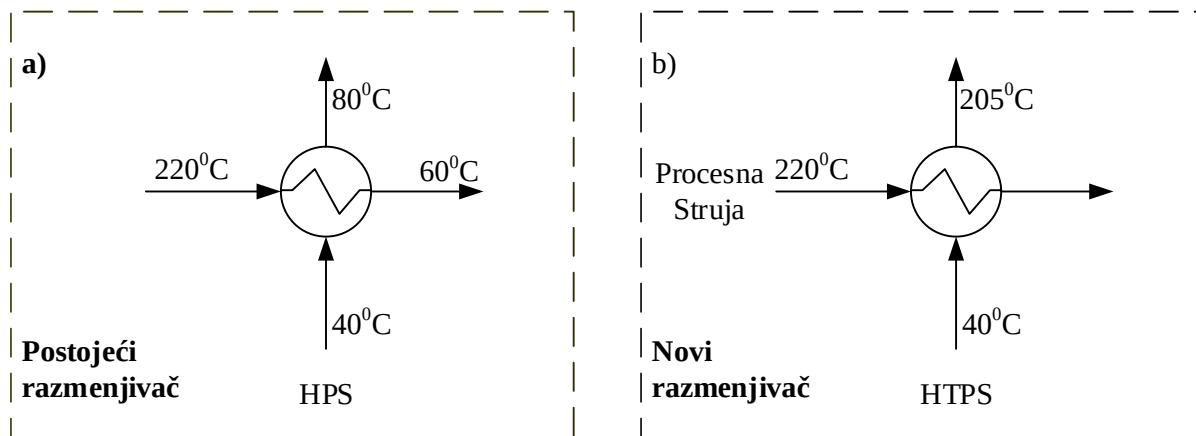
Kao što se sa Slike (3.9) vidi pomoću novog predloženog rasporeda moguće je proizvesti toplu pomoćnu struju, iz postrojenja koje ima višak toplote, koja može da zameni pomoćnu struju u postrojenju koje ima manjak toplote. U slučaju prikazanom na Slici (3.9), proizvodi se topla pomoćna struja temperature od 250 °C, u postrojenju koje ima višak toplote, i ova topla pomoćna struja može da zameni pomoćne struje od 200 °C i 240 °C u postrojenju sa manjkom toplote. Kako bi definisali pomoćnu struju neophodno je uvesti termin hladno-topla pomoćna struja

(HTPS), koja u postrojenju koje predstavlja izvor toplote služi kao hladna pomoćna struja, dok u postrojenju koje predstavlja ponor toplote služi kao topla pomoćna struja.

Potrebno je dati odgovor na pitanje da li se višak toplotne energije koju poseduje izvor toplote može upotrebiti za povećanje energetske efikasnosti industrijskog kompleksa. Ovo zavisi od toga da li toplotni izvor može da proizvede pomoćnu struju dovoljnog kvaliteta koja bi se iskoristila kao topla pomoćna struja u postrojenjima ponora toplote. Da bi numerički definisali da li postoji mogućnost za povećanjem kvaliteta toplote uvođenjem nove HTPS, uvodi se veličina integracioni potencijal [120]. Ova veličina definisana je kao odnos promene eksergije HTPS u novom razmenjivaču toplote (Slika 3.10 b) i promene eksergije hladne pomoćne struje u postojećem razmenjivaču toplote (Slika 3.10 a). Integracioni potencijal se definiše sledećom jednačinom:

$$Ip = \frac{\Delta Ex^{HTPS}}{\Delta Ex^{HPS}} \quad (3.25)$$

gde su: ΔEx^{HTPS} – eksergija HTPS u novo uspostavljenom razmenjivaču toplote, ΔEx^{HPS} – eksergija hladne pomoćne struje u postojećem razmenjivaču toplote i Ip - integracioni potencijal.



Slika 3.10 Razmena toplote između procesne i pomoćne struje: a) postojeći razmenjivač, b) novi razmenjivač

Integracioni potencijal je indikator koji ukazuje za koliko se može unaprediti kvalitet toplotne energije HTPS u odnosu na trenutnu situaciju. Velike vrednosti integracionog potencijala ukazuju da se može generisati pomoćna struja sa dosta većim kvalitetom toplotne energije. Korišćenjem

vrednosti integracionog potencijala omogućava se veoma brzo ispitivanje svih mogućnosti za povećanje kvaliteta toplotne energije. Pomoću integracionog potencijala omogućava se da se u početnom koraku odbace opcije koje daju veoma malo unapređenje kvaliteta toplote te usmeravaju analizu na opcije koje mogu dovesti do značajne uštede.

Stijepovic i Linke su predložili proceduru za određivanje eksergije HTPS u novo uspostavljenom razmenjivaču toplote čija se vrednost koristi pri određivanju integracionog potencijala [125]. U predloženoj proceduri eksergija HTPS, određuje se tako što se selektuje topla pomoćna struja iz skupa pomoćnih struja, koje se upotrebljavaju u industrijskom kompleksu, koja ima najveću izlaznu temperaturu, a da je pri tome njena maksimalna temperatura manja od maksimalne temperature procesne struje. Nakon selektovanja tople pomoćne struje određuje se maseni protok HTPS iz energetskog bilansa razmenjivača toplote. Nedostatak predložene procedure je što se topla pomoćna struja selektuje samo na osnovu njene maksimalne temperature. Na primer, u slučajevima kada se koristi vodena para kao topla pomoćna struja i to kao veoma pregrejana, predložena metoda ne dovodi do minimizacije gubitka eksergije. Iz tog razloga, predložena je nova procedura koja otklanja nedostatke predhodne. Nova procedura podrazumeva da se za eksergiju HTPS uzme eksergija tople pomoćne struje koja minimizuje gubitak eksergije definisan jednačinom (3.24).

3.2.3 Izvodljive integracione opcije za upotrebu viška toplote

Nakon određivanja integracionog potencijala za svaku od procesnih struja sa viškom toplote, potrebno je odrediti da li je povezivanje između postrojenja izvodljivo. Svaka nova HTPS može biti usmerena od postrojenja izvora toplote ka energani drugog postrojenja, koje predstavlja ponor toplote, kao što je prikazano na Slici (3.9).

Treba razmotriti da li je povezivanje postrojenja izvodljivo i da li je uslovljeno ograničenjima vezanim za kvantitet i kvalitet HTPS koju je moguće transportovati.

Glavna prednost predloženog načina integracije je da postojeći sistem pomoćnih struja (energana) svakog od integrisanih postrojenja ostaje nepromenjen. Jedina promena je uvođenje novog razmenjivača između procesne i nove HTPS u postrojenju koje predstavlja izvor toplote. Imajući ovo u vidu, sposobnost kontrole procesa i fleksibilnost procesa ostaju na njihovom početnom nivou, jer konfiguracija pomoćnih struja postrojenja izvora i ponora toplote nije promenjena.

Važno je napomenuti da se postrojenja, koja su integrisana na predloženi način, u slučaju incidentnih situacija mogu vratiti na početno stanje, odnosno na nivo prvobitnih operativnih uslova u energani.

HTPS koja se generiše u izvoru toplote može se povezati sa sistemom pomoćnih struja ponora toplote, samo ako ima veću ili jednaku temperaturu od tople pomoćne struje sa kojom se spaja. Prema tome izvodljivost povezivanja između generisane HTPS i tople pomoćne struje (TPS) u energani ponora toplote definisano je sledećim izrazom [120]:

$$w_{i,j,k,l}^T = \begin{cases} 1 & \text{za } (T_{\max}^{novo}) \geq q_{k,l} \\ 0 & \text{za } (T_{\max}^{novo}) < q_{k,l} \end{cases} \quad (3.26)$$

gde su: $w_{i,j,k,l}^T$ - binarna promenljiva koja ukazuje na izvodljivost uspostavljanja veze između postrojenja izvora i i procesne struje j , i postrojenja ponora k i tople pomoćne struje l ; $(T_{\max}^{novo})_{i,j}$ - maksimalna temperatura HTPS, koja se generiše u postrojenju izvora i , u razmeni toplote sa procesnom strujom j ; i $\theta_{k,l}$ - minimalna prihvatljiva temperatura tople pomoćne struje l , u postrojenju ponora toplote k .

Na isti način HTPS se može povezati sa toplom pomoćnom strujom u ponoru toplote, ako ima isti ili veći pritisak od nje. Ograničenje koje je uslovljeno pritiskom može se matematički opisati [120]:

$$w_{i,j,k,l}^P = \begin{cases} 1 & \text{za } (P_{\max}^{novo}) \geq p_{k,l} \\ 0 & \text{za } (P_{\max}^{novo}) < p_{k,l} \end{cases} \quad (3.27)$$

gde su: $w_{i,j,k,l}^P$ - binarna promenljiva koja ukazuje na izvodljivost uspostavljanja veze između postrojenja izvora i , i procesne struje j , i postrojenja ponora k , i tople pomoćne struje l ; $(P_{\max}^{novo})_{i,j}$ - maksimalan pritisak HTPS koji se generiše u postrojenju izvora i u razmeni toplote sa procesnom strujom j ; i $\pi_{k,l}$ - minimalni prihvatljivi pritisak tople pomoćne struje l u postrojenju ponora toplote k .

Veze između postrojenja koje ne zadovoljavaju uslove date jednačinama (3.26) i (3.27) isključene su iz dalje analize. Preostala izvodljiva povezivanja se podvrgavaju daljoj analizi kako bi se procenio uticaj rastojanja na energetske integracije. Rastojanje između izvora toplote i ponora toplote ima veliki uticaj na energetske integracije kako sa termodinamičkog tako i sa ekonomskog aspekta. Povećanjem rastojanja između postrojenja izvora toplote i ponora toplote rastu kapitalni troškovi i gubitak toplote prilikom transporta. Temperatura na kojoj treba da se generiše HTPS da bi se transportovala iz postrojenja izvora toplote i do postrojenja ponora toplote k , definisana je sledećim izrazom:

$$T_{i,j,k,l}^{novo} = q_{k,l} + \Delta T_{i,j,k,l} \quad (3.28)$$

gde je: $T_{i,j,k,l}^{novo}$ - temperatura na kojoj je potrebno generisati HTPS; $\Delta T_{i,j,k,l}$ - pad temperature prilikom prenosa od izvora toplote i do ponora toplote k .

Pad temperature se utvrđuje za određene atmosferske uslove, debljinu izolacije i temperaturu pomoćne struje.

3.2.4 Određivanje maksimalnog iskorišćenja odbačene toplote

Karakteristika svih do sada razvijenih metoda za energetske integracije je da je neophodno napraviti koncept određivanja maksimalne teorijske uštede energije pre faze projektovanja integracionog sistema. Upotreba ovog koncepta omogućava da se relativno jednostavno utvrdi da li je količina energije koja se može uštedeti dovoljno isplativa da bi se otpočelo sa fazom detaljnog projektovanja integracionog sistema. Ako je potencijal za uštedu energije integrisanjem mali, odnosno nije profitabilan, nepotrebno je ići na korak projektovanja mreže razmenjivača toplote. U metodi razvijenoj u ovoj doktorskoj disertaciji koncept određivanja maksimuma uštede energije pre projektovanja je takođe sastavni deo metode. Nakon određivanja potencijala za uštedu energije, predložena metoda definiše korake za projektovanje mreže razmenjivača toplote i cevovoda koji bi omogućili maksimalnu profitabilnost. Nakon trećeg koraka u kome se uklanjanju sve neizvodljive integracione opcije, u koraku koji je opisan u ovom poglavlju određujemo najoptimalnije integracione opcije. Cilj ovog koraka je da se odredi maksimalna efikasnost kombinovane proizvodnje električne energije i toplih pomoćnih struja u industrijskom kompleksu.

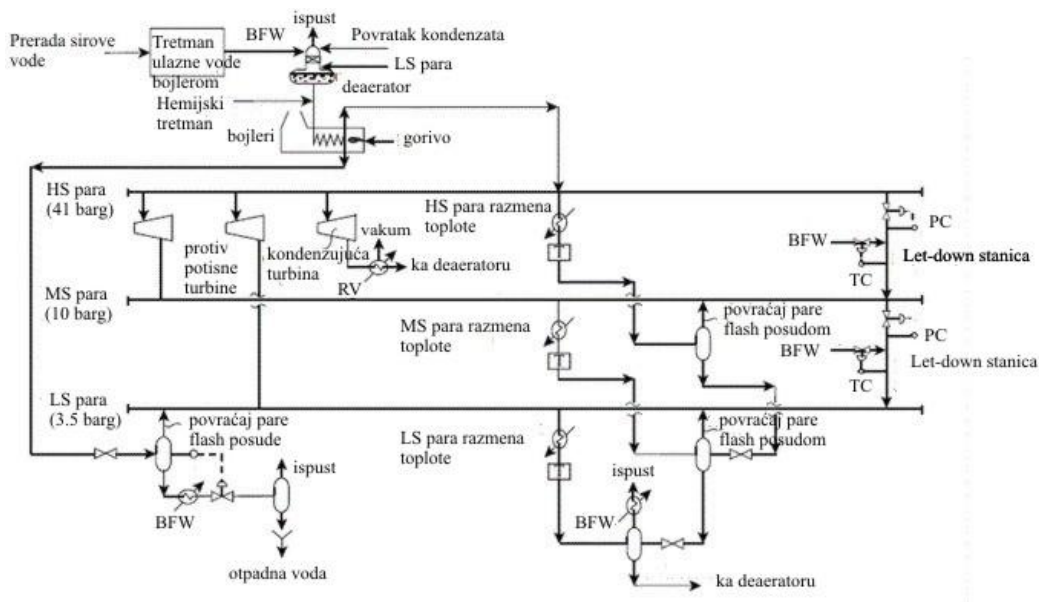
U ovoj tezi će se razmatrati dve osnovne alternative, u zavisnosti od prioriteta:

- (i) Maksimizovanje proizvodnje električne energije, pri čemu je potrošnja goriva konstantna,
- (ii) Minimizovanje potrošnje fosilnih goriva u energanama uz konstantu proizvodnju električne energije i toplih pomoćnih struja.

Pojednostavljen prikaz energana u industrijskom kompleksu dat je na Slici (3.11), koji se sastoji od protiv-pritisnih i kondenzujućih parnih turbine [122]. Ekspanzijom pare veoma visokog pritiska kroz protiv-pritisnu turbinu, generiše se osovinski rad i para zahtevanog kvaliteta. Proizvedeni osovinski rad može se direktno povezati sa uređajima u postrojenju koji zahtevaju rad (kompresori, pumpe, vazdušni hladnjaci itd.) ili sa strujnim generatorom. Rashladno-grejni fluid se dovodi u glavnu liniju tople pomoćne struje i spaja se sa strujom koja izlazi iz protiv-pritisne turbine Slika (3.11) i za nju važi jednačina (3.29):

$$m_{k,l}^{ps} + m_{i,j,k,l} - m_{k,l}^{turb} = 0 \quad (3.29)$$

gde je: $m_{k,l}^{ps}$ - maseni protok pomoćne struje l , u postrojenju ponora toplote, $m_{i,j,k,l}$ - maseni protok HTPS, $m_{k,l}^{turb}$ - maseni protok kroz turbinu pomoćne struje l , u postrojenju ponorak.



Slika 3.11 Šematski prikaz energane i sistema pomoćnih struja

Protok tople pomoćne struje $m_{k,l}^{ps}$ potrebno je da bude nepromenjen, tako da se na osnovu jednačine (3.29) može “podesiti” maseni protok pare kroz turbinu $m_{k,l}^{turb}$, i maseni protok HTPS $m_{i,j,k,l}$. Parne turbine koje su direktno vezane za delove opreme u postrojenju i zahtevaju dovodjenje rada, moraju da obezbede konstantnu količinu energije, tako da podešavanje protoka kroz ove turbine nije izvodljivo. To znači da je protok moguće regulisati samo u slučaju kada je turbina povezana sa generatorom električne energije. Smanjenjem masenog protoka kroz protiv - pritiskne parne turbine dovodi do smanjenja proizvodnje električne energije, čija se količina može nadomestiti ili uvozom iz spoljne mreže ili usmeravanjem viška pare veoma visokog pritiska ka kondenzujućim turbinama, pri čemu dolazi do povećanja proizvodnje električne energije. Izbor optimalne alternative zavisi, pre svega od cene električne energije koja se uvozi ili generiše u energiji.

Na osnovu Slike (3.11) za svako postrojenje k , važi uslov da je proizvodnja pare u kotlu jednaka protocima pare kroz turbine u sistemu. Uslov se može matematički opisati kao:

$$\sum_l m_{k,l}^{turb} - m_k^{vap} = 0 \quad (3.30)$$

gde je: m_k^{vap} - proizvedena količina pare veoma visokog pritiska (VHS).

Protok kroz turbine može imati vrednost koja se nalazi između minimalne i maksimalne granične vrednosti, koje su specifične za određenu turbinu tj. predstavljaju parametre turbine. Ako je turbina isključena iz sistema vrednost protoka ima nultu vrednost. Da bi se matematički definisala ograničenja masenog protoka uvodi se binarna promenljiva $u_{k,l}$, koja ima vrednost 1 ako turbina radi ili vrednost 0 ako je turbina isključena iz sistema. Ograničenja vezana za maseni protok kroz turbinu mogu se opisati sledećim izrazom:

$$u_{k,l} \cdot m_{k,l}^{tmin} \leq m_{k,l}^{turb} \leq u_{k,l} \cdot m_{k,l}^{tmax} \quad (3.31)$$

$m_{k,l}^{tmin}$, $m_{k,l}^{tmax}$ - minimalni i maksimalni protok kroz turbine pomoćne struje l u postrojenju k .

Slično protoku kroz turbine i količina HTPS fluida uzima vrednost između minimalne i maksimalne, a ako ne postoji konekcija, vrednost masenog protoka uzima 0 vrednost. Granične vrednosti masenog protoka HTPS fluida se mogu prikazati kao:

$$b_{i,j,k,l} \cdot m_{i,j,k,l}^{\min} \leq m_{i,j,k,l} \leq b_{i,j,k,l} \cdot m_{i,j,k,l}^{\max} \quad (3.32)$$

gde su: $m_{i,j,k,l}^{\min}$, $m_{i,j,k,l}^{\max}$ - minimalni i maksimalni maseni protoci fluida.

Toplota koja je potrebna za proizvodnju HTPS fluida, koji se proizvodi u postrojenju izvora toplote, mora da bude manja ili jednaka višku toplote koji izvor poseduje. Dato ograničenje se matematički može izraziti sledećom jednačinom:

$$\sum_k \sum_l m_{i,j,k,l} \left[Cp_L (q_{k,l}^{sat} - q_{in,i}) + \Delta H_{vap} (q_{k,l}^{sat}) + Cp_G (q_{k,l}^{gas} - q_{k,l}^{sat}) \right] \leq \Theta_{i,j} \quad (3.33)$$

gde je: Cp_L - toplotni kapacitet pomoćne struje u tečnom stanju (kJ/kg/K), Cp_G - toplotni kapacitet pomoćne struje u gasovitom stanju (kJ/kg/K), $\Delta H_{vap} (q_{k,l}^{sat})$ - latentna toplota fazne transformacije pomoćne struje l , u postrojenju ponora toplote k (kJ/kg), $q_{in,i}$ - ulazna temperatura tečne faze pomoćne struje koja se generiše u postrojenju i (° C), $q_{k,l}^{sat}$ - temperatura zasićenja pomoćne struje l , postrojenja ponora k (° C), $q_{k,l}^{gas}$ - je zahtevana temperatura povraćene pomoćne struje na ulazu u cevovod u cilju stvaranja izvodljive konekcije sa pomoćnom strujom l , postrojenja ponora k (° C), i $\Theta_{i,j}$ - višak toplote koji izvor poseduje (kJ/kg).

HTPS iz različitih postrojenja mogu se dovesti u glavnu pomoćnu struju drugog postrojenja, što je definisano sledećim izrazom:

$$m_{k,l}^{ps} + \sum_l m_{i,j,k,l} - m_{k,l}^{turb} = 0 \quad (3.34)$$

Jednačine od (3.29) do (3.34) definišu ograničenja u linearnoj formi. Funkcije cilja za dve predložene alternative za integraciju industrijskog kompleksa mogu se definisati kao:

- Maksimizovanje proizvodnje električne energije,

$$\max \Phi = \sum_k \sum_l W_{k,l} \quad (3.35)$$

- Minimizovanje potrošnje fosilnih goriva,

$$\min \Psi = \sum_k m_k^{fuel} = \sum_k m_k^{VHS} \quad (3.36)$$

gde je: $W_{k,l}$ - proizvedena snaga na turbini u postrojenju ponora k , pomoćne struje l , m_k^{fuel} - maseni protok goriva u postrojenju ponora k , m_k^{VHS} - maseni protok pare vrlo visokog pritiska u postrojenju ponora k .

Jednačine od (3.29) do (3.36) definišu mešovito celobrojno - linearni optimizacioni problem, čijim rešavanjem se dobijaju optimalne vrednosti promenljivih za definisanu funkciju cilja. Dobijene vrednosti odgovaraju maksimalnim vrednostima uštede koje se mogu ostvariti u postojećem industrijskom kompleksu. Određivanjem maksimalne uštede pre projektovanja omogućava da se sagleda mogućnost uštede i sama efikasnost industrijskog kompleksa. Ukoliko postoje mogućnosti za značajnom uštedom pristupa se sledećem koraku, u kome se uključuju i ekonomski aspekti.

3.2.5 Projektovanje integracionog sistema upotrebom viška toplote i kogeneracijom

Nakon određivanja maksimalnog iskorišćenja viška toplote u industrijskom kompleksu i procene da li postoje mogućnosti za značajna unapređenja, pristupa se koraku projektovanja mreže cevovoda i razmenjivača toplote. Formulacija konkretnog problema zavisi od ekonomskih ciljeva ekoloških normi i zakona, tako da se ne može definisati opšta funkcija cilja koja bi opisivala sve slučajeve. U ovoj doktorskoj disertaciji predložena je funkcija cilja koja uzima u obzir samo ekonomske kriterijume, tj. maksimizuje ukupni godišnji profit (GP) i može se izraziti sledećom jednačinom:

$$\max GP = R - \frac{TOC}{SOL} \quad (3.37)$$

GP - ukupni godišnji profit, R - vrednost proizvedena integracijom, TOC - ukupni kapitalni troškovi i SOL - radni vek sistema.

Kao i u koraku 3.4, razmatraćemo dve alternative: 1) maksimizovanje proizvodnje električne energije, 2) minimizovanje potrošnje goriva.

Ukupan godišnji prihod u funkciji cilja (jednačina 3.37) se drugačije definiše u zavisnosti od razmatrane alternative. Za slučaj maksimizovanja proizvodnje električne energije ukupna vrednost dobijena integracijom je definisan sledećom jednačinom:

$$R = \sum_k \sum_l (E_{k,l}^{novo} - E_{k,l}^{trenutno}) \cdot C_{el} \quad (3.38)$$

gde je: $E_{k,l}^{novo}$ - vrednost generisane električne energije nakon uspostavljanje integracije, $E_{k,l}^{trenutno}$ - vrednost generisane električne energije pre uspostavljanja integracije, C_{el} – cena električne energije.

Za slučaj minimizovanja potrošnje goriva, ukupan godišnji prihod se može definisati sledećom jednačinom:

$$R = \sum_k \sum_l (m_{k,l}^{G,trenutno} - m_{k,l}^{G,novo}) \cdot C_g \quad (3.39)$$

$m_{k,l}^{G,trenutno}$ - maseni protok goriva koji se troši pre energetske integracije, $m_{k,l}^{G,novo}$ - maseni protok goriva koji se troši nakon energetske integracije i C_g - cena goriva.

Ukupni kapitalni troškovi, mogu se izraziti sledećom jednačinom:

$$TCC = \sum_{i \in I^P} \sum_{j \in J^I} \sum_{k \in K^P} \sum_{l \in L^K} b_{i,j,k,l} \cdot (Cost_{Hex_{i,j,k,l}} + P_{cul_{i,j,k,l}} \cdot L_{i,j,k,l}) \quad (3.40)$$

gde su: $L_{i,j,k,l}$ - rastojanje (m) između novouspostavljenog razmenjivača u postrojenju izvoru i , procesne struje j i TPS l u postrojenju ponora k , P_{cul} - odgovarajuća cena cevi (\$/m) i $Cost_{Hex}$ - cena koštanja razmenjivača toplote (\$).

Jednačine (3.29-3.34) i (3.39-3.40) definišu mešovito celobrojno – nelinerani optimizacioni problem, čijim rešavanjem se dobijaju optimalne vrednosti promenljivih za definisanu funkciju cilja. Rešavanjem ovog optimizacionog problema dobija se optimalna mreža razmenjivača i cevovoda za definisanu funkciju cilja.

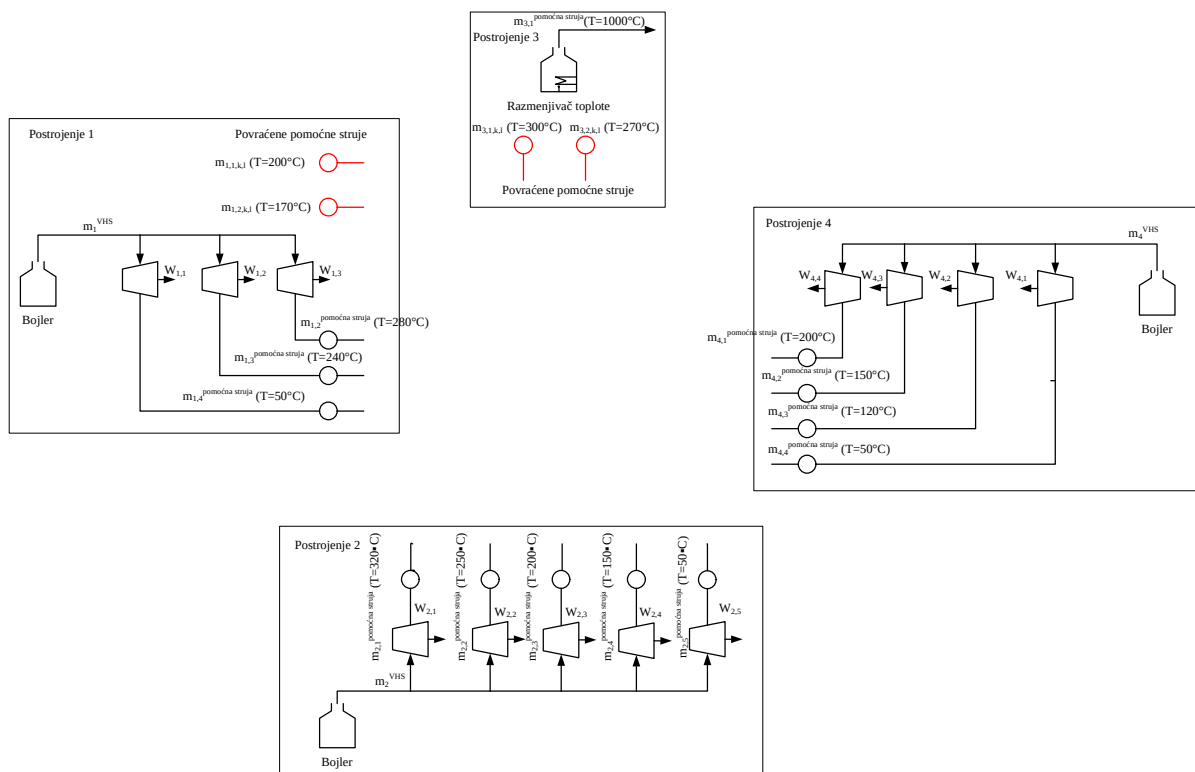
Detaljna primena metode za energetske integracije industrijskog kompleksa data je u sledećem poglavlju.

4. Primena metode na studiju slučaja

U ovom poglavlju biće prikazana i diskutovana primena metode za energetske integraciju industrijskog kompleksa, koji je dat slikom (4.1), koja je razvijena u prethodnom poglavlju. Sa Slike (4.1) se vidi da se industrijski kompleks sastoji od četiri postrojenja zajedno sa nezavisnim energijama za svako postrojenje. Takođe, tabelama (4.1), (4.2) i (4.3) dati su podaci za zahteve za toplim pomoćnim strujama u industrijskom kompleksu, podaci za procesne i hladne pomoćne struje u razmenjivačima toplote i podaci za proizvodnju električne energije i maseni protok kroz turbine. Na osnovu ovih podataka izvršiće se studija slučaja datog industrijskog kompleksa. Cilj metode je da se uspostavi integraciona mreža koja bi povećala sposobnost industrijskog kompleksa da toplotnu energiju iskoristi na što efikasniji način. Višak toplote koji se u početnoj konfiguraciji industrijskog kompleksa odbacuje u okolinu, upotrebom predložene metode moguće je delimično vratiti u sistem toplih pomoćnih struja industrijskog kompleksa. Kako bi se što detaljnije ilustrovala primena metode (iz poglavlja 3), pretpostavićemo da se industrijski kompleks sastoji od četiri nezavisna postrojenja (Slika 4.1). Svako od postrojenja poseduje sopstvenu energiju kojom se obezbeđuje potrebna količina toplotne, mehaničke i električne energije (Slika 4.1). Primena svakog od koraka metode, koji su dati u prethodnom poglavlju detaljno je prikazana u narednom tekstu.

4.1 Prikupljanje i obrada podataka

U delu 3.3.1 definisane su četiri osnovne kategorije podataka koje je potrebno obezbediti da bi se metoda uspešno primenila i to su: (i) operativni podaci za sistem toplih pomoćnih struja, (ii) operativni podaci za procesne struje i hladne pomoćne struje u razmenjivačima toplote u kojima se uklanja višak toplote iz procesa, (iii) radni podaci za turbine u različitim režimima rada i (iv) dispazicioni podaci (rastojanja između postrojenja).



Slika 4.1 Šematski prikaz konfiguracije energana u industrijskom kompleksu

4.1.1 Operativni podaci sistema toplih pomoćnih struja

Za nesmetano odvijanje procesa, potrebne su tople pomoćne struje (TPS) različitog toplotnog kvaliteta. U cilju što veće iskorišćenosti toplotne energije proizvedene sagorevanjem fosilnih goriva, u energanama se u kogenerativnom procesu deo toplote koristi za proizvodnju tople pomoćne struje, a deo toplote se pretvara u osovinski rad upotrebom turbina. Izvesna količina TPS se može proizvesti upotrebom “let-down“ stanica. Upotreba “let-down“ stanica za proizvodnju TPS je energetska neefikasan proces jer se gubi radni potencijal usled gubitka eksergije pritiska, ali uprkos energetska neefikasnosti, upotreba ovih uređaja omogućuje značajnu fleksibilnost rada energana.

Predložena metoda za energetska integraciju industrijskog kompleksa podrazumeva da se deo tople pomoćne struje, koja je proizvedena u energani, može zameniti toplom strujom koja je proizvedena u drugom nezavisnom postrojenju razmenom toplote između hladne pomoćne struje i tople procesne struje. Zamena dela TPS omogućena je manipulacijom proizvodnje i distribucije vodene pare u energanama. S druge strane, manipulacija proizvodnje i distribucija vodene pare utiče na proizvodnju električne energije u energanama. U zavisnosti od cene električne energije,

smanjenje ili povećanje generisanja električne energije u energanama usled integracije može se nadomestiti uvozom iz spoljnih izvora ili izvozom u električnu mrežu.

TPS se proizvode propuštanjem vodene pare veoma visokog pritiska kroz turbine i “let down“ stanice. Da bi se odredile karakteristike TPS potrebno je da se pored podataka o masenom protoku prikupe i podaci o pritisku, temperaturi suvozasicene pare i temperaturi zasićenja.

S obzirom na to da većina savremenih postrojenja poseduje centralizovan sistem za merenje i upravljanje, svi navedeni podaci mogu se preuzeti iz direktno merenih kontinualnih podataka. Potrebni podaci za TPS za sva četiri posmatrana postrojenja data su u Tabeli (4.1):

Tabela 4.1 Zahtevi za toplim pomoćnim strujama u industrijskom kompleksu

Postojenje Broj	Tople pomoćne struje				
	Vrsta	T _{ulaz} (°C)	T _{izlaz} (°C)	P (bar)	Maseni Protok (kg/s)
1	Toplo	400	340	2	13.96
1	Para	280	240	33.48	12.16
1	Para	240	200	15.55	14.18
2	Para	320	240	33.48	10.01
2	Para	250	220	23.2	20.05
2	Para	200	170	7.92	9.90
2	Para	150	120	1.98	12.36
4	Para	220	190	12.53	9.24
4	Para	150	130	2.70	11.28
4	Para	120	105	1.21	10.11

4.1.2 Operativni podaci za hladne pomoćne struje i procesne struje u kojima se uklanja višak toplote

Da bi se odredio kvalitet viška toplote koji se uklanja iz postrojenja upotrebom rashladnih fluida, potrebno je prikupiti operativne podatke za procesne struje, kao i hladne pomoćne struje. Kao što je navedeno u predhodnom poglavlju, pretpostavlja se da su novouspostavljeni razmenjivači

toplote suprotno strujnog tipa, što omogućava minimalnu površinu za toplotnu razmenu usled maksimalne razlike temperatura. U slučaju da procesna struja prilikom razmene toplote sa hladnom pomoćnom strujom ne podleže faznoj transformaciji, potrebni podaci su ulazna i izlazna temperatura procesne struje u razmenjivaču toplote, kao i količina razmenjene toplote (Tabela 4.2). Kada prilikom razmene toplote dolazi do fazne transformacije procesne struje, potrebno je odrediti količinu toplote koja se oslobodi: (i) tokom hlađenja pregrejane pare do temperature ključanja, (ii) tokom fazne transformacije i (iii) tokom hlađenja od temperature ključanja do temperature pothlađene tečnosti. Potrebno je prikupiti podatke i za temperaturu rose i ključanja, kao i ulazne i izlazne temperature iz razmenjivača toplote. Ovi podaci su potrebni da bi se izbegao ukrštaj (sečenje) temperatura u suprotno strujnom razmenjivaču toplote. Procesne struje razmotrene u ovoj analizi ne podležu faznoj transformaciji i potrebni podaci dati su u Tabeli (4.2). Za hladne pomoćne struje (HPS) potrebni su podaci o vrsti pomoćne struje, temperaturina ulazu i izlazu iz razmenjivača i pritisku pomoćnog fluida. Potrebni podaci za HPS dati su Tabeli (4.2).

Table 4.2 Podaci za procesne i hladne pomoćne struje u razmenjivačima toplote

Postrojenje Broj	Procesne struje			Hladne pomoćne struje			
	$T_{ulaz}(^{\circ}\text{C})$	$T_{izlaz}(^{\circ}\text{C})$	ΔH (kW)	Vrsta	$T_{ulaz}(^{\circ}\text{C})$	$T_{izlaz}(^{\circ}\text{C})$	P (bar)
1	230	60	30000	Vazduh	30	40	1.1
1	200	55	20000	Vazduh	30	40	1.1
1	55	40	10000	Voda	30	35	1
2	200	60	20000	Para	30	170	2.7
3	330	60	25000	Voda	30	40	1
3	300	70	20000	Voda	30	40	1
4	180	50	12000	Para	30	150	4.76

4.1.3 Podaci za turbine

Turbine i „let-down“ stanice omogućavaju da se vodena para veoma visokog pritiska, koja je proizvedena u kotlovima, prevede u osovinski rad i tople pomoćne struje odgovarajućih

karakteristika. Potrebni podaci za primenu metode su operativni parametri i specifični parametri, koji zavise od karakteristika samog uređaja.

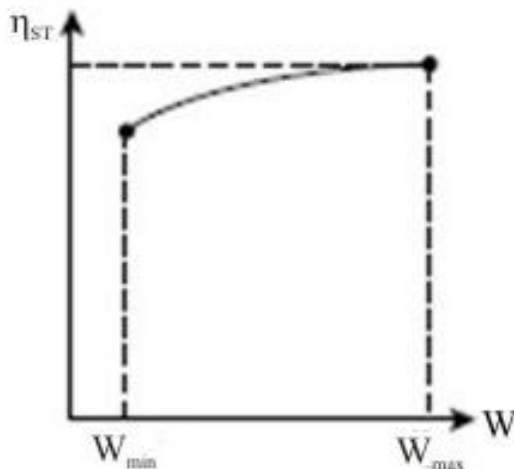
Operativni parametri turbina su pritisci i temperature na ulazu i izlazu, maseni protok i razvijena snaga. U Tabeli 4.3 prikazani su operativni parametri za razmatranu studiju slučaja.

Tabela 4.3 Proizvodnja električne energije i maseni protok pare kroz turbine

Postrojenje Broj	Turbina Broj	Snaga (kW)	Maseni protok (kg/sec)
1	1	2984.7	12.9
	2	5455.9	14.55
	3	9640.4	10
2	1	2603.7	11.35
	2	6503.8	21
	3	4775.0	10.23
	4	8190.2	12.67
	5	13976.9	14.37
3	-	-	-
4	1	3826.2	9.6
	2	6952.4	11.46
	3	7135.0	10.22
	4	7655.6	8

Specifični parametri turbina koje je potrebno prikupiti zavise od primenjenog matematičkog modela, kojim je definisan odnos između proizvedenog rada i masenog protoka vodene pare kroz uređaj. U ovoj studiji slučaja primenjen je model Varbanova i autora, koji se pokazao veoma uspešan u određivanju vrednosti osovinskog rada pri delimičnom opterećenju čime je omogućeno da se model uspešno koristi u optimizacionim studijama [123]. Model turbine je definisan u linearnoj formi, što ga čini pogodnijim za upotrebu od nelinearnog modela u optimizacionim studijama.

Karakteristika parnih turbina je da je efikasnost proporcionalna osovinskom radu koji turbina proizvodi. Na Slici (4.2) prikazana je zavisnost ukupne efikasnosti turbine od proizvedenog osovinskog rada [122]. W_{min} označava minimalan rad koji turbina može da proizvede i on je proporcionalan minimalnom masenom protoku kroz turbinu, dok W_{max} označava maksimalni rad koji turbina može da proizvede i on je proporcionalan maksimalnom masenom protoku kroz turbinu.



Slika 4.2 Zavisnost ukupne efikasnosti od osovinskog rada

Ukupna efikasnost turbine η_{st} sastoji se iz dve komponente: termodinamičke i mehaničke komponente. Termodinamička komponenta definisana je preko izentropske efikasnosti, dok je mehanička komponenta definisana preko mehaničke efikasnosti. Izentropska efikasnost ukazuje sa kojom se efikasnošću termička energija pretvara u mehaničku energiju, dok mehanička efikasnost ukazuje sa kojom se efikasnošću mehanička energija pretvara u električnu energiju i ukazuje na mehaničke gubitke usled trenja, toplotne gubitke itd. Izentropska efikasnost definisana je preko sledeće jednačine [122]:

$$\eta_{izentropsko} = \frac{\Delta h_{stvarno}}{\Delta h_{izentropsko}} \quad (4.1)$$

gde su: $\eta_{izentropsko}$ - izentropska efikasnost turbine, h_{ulaz} - specifična entalpija ulazne vodene pare, h_{izlaz} - specifična entalpija izlazne vodene pare, $h_{izentropsko}$ - entalpija pare na izlaznom pritisku koja ima istu entropiju kao ulazna struja.

$$\Delta h_{\text{stvarno}} = h_{\text{ulaz}} - h_{\text{izlaz}} \quad (4.2)$$

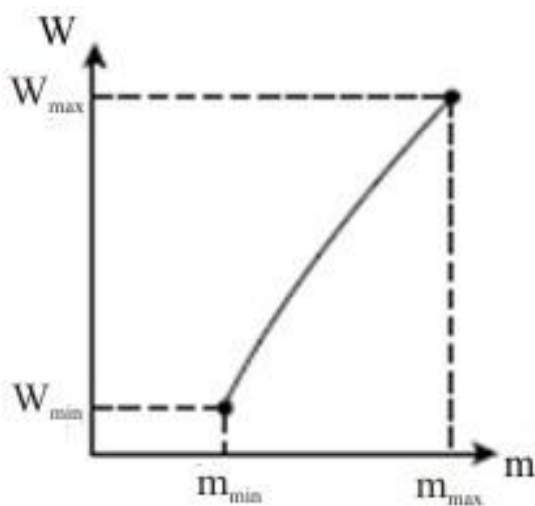
$$\Delta h_{\text{izentropsko}} = h_{\text{ulaz}} - h_{\text{izlaz, izentropsko}} \quad (4.3)$$

Za izentropsku efikasnost je karakteristično da zavisi od masenog protoka vodene pare, i što je veći maseni protok izentropska efikasnost je veća. Karakteristika mehaničke komponente efikasnosti je da ima visoku vrednost i da je nezavisna od masenog protoka vodene pare. Ukupna efikasnost se može prikazati kao proizvod mehaničke i izentropske efikasnosti sledećom jednačinom:

$$h_{ST} = h_{\text{izentropsko}} \cdot h_{\text{mekaničko}} \quad (4.4)$$

gde je: h_{ST} - ukupna efikasnost i $h_{\text{mekaničko}}$ - mehanička efikasnost.

Na Slici 4.3 prikazana je zavisnost osovinskog rada od masenog protoka, koja se naziva Willanova linija [124,125]. Ona ukazuje na nelinearnu zavisnost između osovinskog rada i masenog protoka. Kako nelinearnost nije velika u određenom opsegu masenog protoka vodene pare, ova zavisnost se može aproksimirati linearanom funkcijom.



Slika 4.3 Zavisnost osovinskog rada od masenog protoka vodene pare

Linearana zavisnost je određena sledećim izrazom:

$$W = n \cdot m - W_{ods} \quad (4.5)$$

gde su: W - proizvedeni osovinski rad, m - maseni protok vodene pare kroz turbinu, n - nagib linearne Willanove linije, W_{ods} - odsečak Willanove linije.

Osovinski rad se može izraziti preko sledeće jednačine [124,125]:

$$W = \Delta h_{stvarno} \cdot m - W_{gubitaka} \quad (4.6)$$

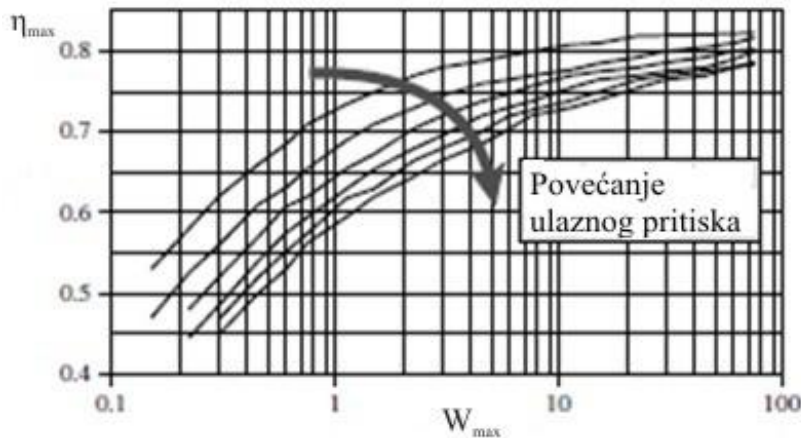
gde je: $W_{gubitaka}$ - energetski gubitak u turbini.

Pošto je odsečak linearne Willanove linije konstantna vrednost, kao i maksimalan rad koji turbina može proizvesti, moguće je uspostaviti sledeći odnos između ova dva parametra [124,125]:

$$W_{ods} = L \cdot W_{max} \quad (4.7)$$

gde je: W_{max} - maksimalni osovinski rad turbine, L - parametar koji zavisi od karakteristika turbine.

Za određivanje vrednosti osovinskog rada pri delimičnom opterećenju, neohodno je odrediti parametre pri maksimalnom opterećenju. Na Slici (4.4) prikazane su zavisnosti ukupne efikasnosti od maksimalnog osovinskog rada u zavisnosti od promene ulaznog pritiska [126].



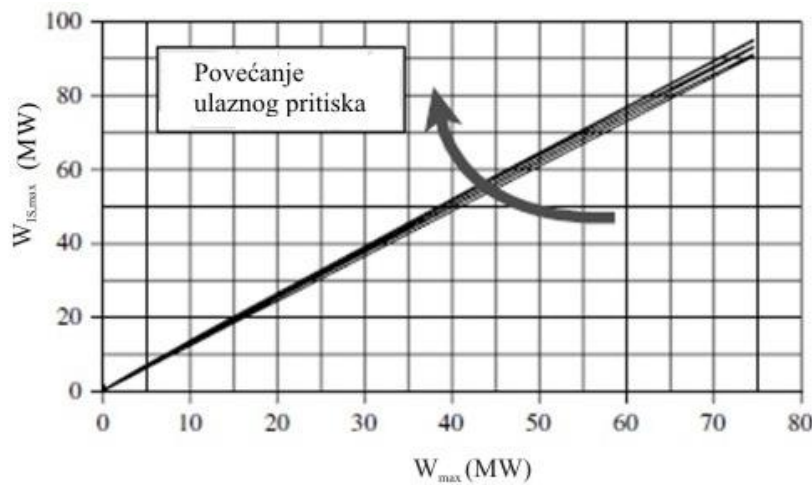
Slika 4.4 Zavisnost ukupne efikasnosti od maksimalnog proizvedenog osovinskog rada sa promenom ulaznog pritiska

Maksimalni izentropski rad se u zavisnosti od maksimalne osovinske snage i ukupne efikasnosti može prikazati sledećom jednačinom:

$$W_{izentropsko,max} = \Delta h_{izentropsko} \cdot m_{max} = \frac{W_{max}}{\eta_{ST,max}} \quad (4.8)$$

gde su: $W_{izentropsko,max}$ - izentropski rad za maksimalni protok vodenepare kroz turbinu, m_{max} - maksimalni protok vodene pare kroz turbinu, $\eta_{ST,max}$ - ukupna efikasnost parne turbine za maksimalni protok.

Na Slici (4.5) prikazane su zavisnosti maksimalne vrednosti izentropskog rada za maksimalne vrednosti proizvedenog osovinskog rada na različitim pritiscima [123].



Slika 4.5 Zavisnost maksimalno proizvedenog osovinskog rada i maksimalnog izentropskog rada za različite ulazne pritiske

Imajući u vidu da je u pitanju skoro linearna zavisnost (prikazana na Slici (4.5)), ona se može matematički izraziti sledećim izrazom [91]:

$$W_{izentropsko,max} = a + b \cdot W_{max} \quad (4.9)$$

gde su: a i b - korelacioni koeficijenti

Vrednosti koeficijenta a i b zavise od pada pritiska u turbini. Razlika pritisaka može se izraziti preko temperature zasićenja ($T_{zasićenja}$), tako da se parametric a i b mogu korelisati korišćenjem sledećih funkcija [123]:

$$a = a_0 + a_1 \cdot \Delta T_{zasićenja} = a_0 + a_1 \cdot (T_{zasićenja,ulaz} - T_{zasićenja,izlaz}) \quad (4.10)$$

$$b = a_2 + a_3 \cdot \Delta T_{zasićenja} = a_2 + a_3 \cdot (T_{zasićenja,ulaz} - T_{zasićenja,izlaz}) \quad (4.11)$$

gdesu: $T_{zasićenja,ulaz}$ - temperatura zasićenja vodene pare na ulazu u turbinu, $T_{zasićenja,izlaz}$ - temperatura zasićenja vodene pare na izlazu iz turbine i a_0, a_1, a_2, a_3 – korelacioni koeficijenti.

Date koeficijente potrebno je korelisati na osnovu podataka koji su dati za određenu turbinu od strane proizvođača ili na osnovu operativnih podataka postojeće turbine. Linearna Willanova linija za maksimalni protok kroz turbinu definiše se sledećom jednačinom:

$$W_{max} = n \cdot m_{max} - W_{ods} \quad (4.12)$$

Zamenom jednačine (4.7) u jednačinu (4.12) dobija se sledeći izraz:

$$W_{max} = n \cdot m_{max} - L \cdot W_{max} \quad (4.13)$$

Jednačina (4.13) može se jednostavnije prikazati u sledećem obliku:

$$W_{max} = \frac{n \cdot m_{max}}{L + 1} \quad (4.14)$$

Zamenom jednačine (4.14) u jednačinu (4.9) dobija se:

$$\Delta h_{izentropsko} \cdot m_{max} = a + b \cdot \frac{n \cdot m_{max}}{L + 1} \quad (4.15)$$

Iz jednačine (4.15) može se izraziti nagib Willan-ove linije [123]:

$$n = \frac{L + 1}{b} \cdot \left(\Delta h_{izentropsko} - \frac{a}{m_{max}} \right) \quad (4.16)$$

Odsečak linearne Willan-ove linije dobija se zamenom jednačina (4.14) i (4.16) u jednačinu (4.12) [123]:

$$W_{ods} = \frac{L}{b} \cdot (\Delta h_{izentropsko} \cdot m_{max} - a) \quad (4.17)$$

Da bi se definisao model turbine u potpunosti, za određenu turbinu iz radnih podataka potrebno je korelisati sledeće koeficijente a_0, a_1, a_2, a_3 i L .

Tabela 4.4. Podaci potrebni za određivanje koeficijenata za turbine

Snaga (MW)	Maseni protok pare kroz			Temperatura pare na izlazu			Pritisak pare na izlazu iz		
	Ulaz	Stepen 1	Stepen 2	Ulaz	Stepen 1	Stepen 2	Ulaz	Stepen 1	Stepen 2
15.54	140.00	90.00	50.00	380.00	260.00	46.00	40	20.00	0.10
12.73	130.00	85.00	45.00	381.00	259.00	45.00	40.2	19.95	0.10
9.86	120.00	80.00	40.00	381.00	259.00	45.00	40.2	19.95	0.10
15.93	150.00	100.00	50.00	380.00	260.00	45.00	40	20.00	0.10
14.75	120.00	70.00	50.00	380.00	260.00	45.00	40	20.00	0.10

U prikazanoj studiji slučaja primenjuju se korelacioni parametri za turbine, koji su prikazani u Tabeli (4.5) [127].

Tabela 4.5 Korelacioni parametri za parne turbine

	Protiv-pritisna turbine		Kondenzujuća turbina	
	$W_{\max} < 2000 \text{ kW}$	$W_{\max} > 2000 \text{ kW}$	$W_{\max} < 2000 \text{ kW}$	$W_{\max} > 2000 \text{ kW}$
$a \text{ (kW)}$	$1.08 \cdot \Delta T_{\text{zasićenja}}$	$4.23 \cdot \Delta T_{\text{zasićenja}}$	$0.662 \cdot \Delta T_{\text{zasićenja}}$	$-463 + 3.53 \cdot$
$b \text{ (-)}$	$1.097 + 0.00172 \cdot$	$1.097 + 0.00172 \cdot$	$1.191 +$	$1.220 + 0.000148 \cdot$

4.2 Određivanje potencijala za uštedu energije

Na osnovu podataka prikupljenih u predhodom koraku proračunava se integracioni potencijal svake od procesnih struja u kojima se uklanja toplota upotrebom hladne pomoćne struje.

Na osnovu podataka prikazanih u Tabeli 4.2 i uzimanjem u obzir minimalne razlike temperatura između procesne i rashladne struje, moguće je odrediti vrednosti maksimalne temperature hladno-tople pomoćne struje (HTPS). Vrednost minimalne razlike temperatura je 30°C za sve razmenjivače, osim za razmenjivače u kojima je minimalna razlika temperatura u originalnoj konfiguraciji manja od 30°C. U tim razmenjivačima minimalna razlika temperatura je 15°C, dok u slučaju kada se za hlađenje koristi rashladna voda minimalna razlika temperatura je 10°C. Vrednosti minimalne razlike temperatura između HTPS i procesne struje preuzete su iz rada Stijepović i Linke [120].

Primenom jednačine (3.25) određuje se TPS koja ima najveći potencijal da bude zamenjena. Određivanje integracionog potencijala biće prikazan na primeru hlađenja procesne struje u postrojenju 3 (ulazne temperature 330°C i izlazne 60°C (Tabela 4.2)). Primenom minimalne razlike temperatura od 30°C izračunava se da procesna struja može generisati HTPS izlazne temperature od 300°C. Analizom podataka datih u Tabeli 4.1 može se zaključiti da data procesna struja može da generiše HTPS čiji kvalitet zadovoljava TPS u postrojenjima jedan, dva i četiri. S obzirom da je TPS moguće zameniti vodenom parom različitog kvaliteta, zavisnost entalpije u funkciji od temperature pri generaciji vodene pare može se aproksimirati linearnom funkcijom:

$$\Delta h = \begin{cases} C_{p,liq} \cdot (T_{zasićenja} - T_{ulaz}), & \forall T < T_{zasićenja} \\ C_{p,vap} \cdot (T_{zasićenja} + 1 - T_{zasićenja}), & \forall T = T_{zasićenja} \\ C_{p,gas} \cdot (T_{izlaz} - T_{zasićenja} - 1), & \forall T > T_{zasićenja} \end{cases} \quad (4.18)$$

gde su: $C_{p,liq}$, $C_{p,vap}$ i $C_{p,gas}$ - srednji specifični toplotni kapaciteti.

Srednji specifični toplotni kapaciteti određuju se sledećom procedurom: pošto su temperature i pritisci u procesu generisanja pare poznati, upotrebom IAPWS-95 jednačine stanja izračunava se specifična entalpija za ulaznu temperaturu ključale tečnosti, zasićene pare i pregrejane pare, a zatim se za dati pritisak i temperaturu primenom jednačine (4.18) izračunava srednji specifični toplotni kapacitet.

$$C_{p,liq} = \frac{\Delta h_{liq}}{T_{zasićenja} - T_{ulaz}} \quad (4.19a)$$

$$C_{p,sat} = \frac{\Delta h_{zasićenja}}{T_{zasićenja} + 1 - T_{zasićenja}} \quad (4.19b)$$

$$C_{p,gas} = \frac{\Delta h_{gas}}{T_{izlaz} - T_{zasićenja}} \quad (4.19c)$$

gde su: Δh_{liq} , $\Delta h_{zasićenja}$, Δh_{gas} – promene entalpije u tečnoj fazi, pri faznoj transformaciji i u gasnoj fazi respektivno.

Slika 4.6 ukazuje da se u slučaju proizvodnje pare “Pinch” temperatura pojavljuje u tački ključanja pomoćne struje. Ovaj podatak omogućava određivanje masenog protoka generisane vodene pare iz toplotnog bilansa procesne struje i HTPS.

Toplotni bilans procesne struje, može se prikazati sledećom jednačinom:

$$Q = C_{p,ps} \cdot (T_{ulaz} - T_{izlaz}) \quad (4.20)$$

Toplotni bilans HTPS, može se prikazati sledećom jednačinom:

$$Q = m_{HTPS} \left[C_{p,liq} \cdot (T_{zasićenja} - T_{ulaz}) + C_{p,vap} (T_{zasićenja} + 1 - T_{zasićenja}) + C_{p,gas} \cdot (T_{izlaz} - T_{zasićenja} - 1) \right] \quad (4.21)$$

gde je: m_{HTPS} - maseni protok hladno tople pomoćne struje.

Maseni protok HTPS, može se prikazati sledećom jednačinom:

$$m_{HTPS} = \frac{C_{p,ps} \cdot (q_{ulaz} - q_{izlaz})}{\left[C_{p,liq} \cdot (T_{zasićenja} - T_{ulaz}) + C_{p,vap} (T_{zasićenja} + 1 - T_{zasićenja}) + C_{p,gas} \cdot (T_{izlaz} - T_{zasićenja} - 1) \right]} \quad (4.22)$$

Maseni protok se određuje za sve TPS koje mogu biti zamenjene generisanom HTPS, primenom navedene procedure. Rezultati masenog protoka za sve TPS koje mogu biti zamenjene prikazani su u Tabeli 4.6.

Tabela 4.6 Maseni protoci HTPS koje mogu biti generisane u industrijskom kompleksu

	Procesna struja		HTPS			Maseni protok, kg/sec
	$T_{in}, ^\circ C$	$T_{out}, ^\circ C$	$T_{sat}, ^\circ C$	$T_{out}, ^\circ C$	P, bar	
1	230	60	170	200	7.82	3.38
			120	150	1.98	8.21
			130	150	2.7	7.39
			105	120	12.11	9.68
2	200	5	120	150	1.98	4.00
			130	150	2.7	3.30
			105	120	1.21	5.18
3	330	60	240	280	33.48	4.27
			220	250	23.20	5.40
			200	240	15.55	6.28
			190	220	12.53	6.82
			170	200	7.92	7.69
4	300	70	220	250	23.20	3.17
			200	240	15.55	4.13
			190	220	12.53	4.66
			170	200	7.92	5.55

Sada se primenom jednačine (3.24) mogu odrediti gubici eksergije pri prenosu toplote sa procesne struje na HTPS. Promena eksergije procesne struje i HTPS, kao i rezultati gubitaka eksergije za svaku HTPS, dati su u Tabeli 4.7.

Tabela 4.7 Promena eksergije procesne struje i HTPS tokom razmene toplote

Br	Procesna struja			HTPS			$\Delta Ex_{loss}, kW$
	$T_{in}, ^\circ C$	$T_{out}, ^\circ C$	$\Delta Ex, kW$	$T_{sat}, ^\circ C$	$T_{out}, ^\circ C$	$\Delta Ex, kW$	
1	230	60	4009	170	200	2688	1321
			9223	120	150	4842	4382
			8314	130	150	4653	3661
			10513	105	120	4922	5591
2	200	55	4448	120	150	2365	2083
			3668	130	150	2078	1580
			5545	105	120	2632	2913
3	330	60	5446	240	280	4246	1200
			6779	220	250	5085	1694
			7897	200	240	5638	2259
			8444	190	220	5868	2576
			9395	170	200	6112	3283
4	300	70	3955	220	250	2984	971
			5154	200	240	3706	1448
			5724	190	220	4008	1716
			6728	170	200	4415	2313

Za svaki od razmenjivača u kojem se uklanja toplota pomoću rashladnog fluida, određuje se promena eksergije hladne pomoćne struje između ulaza i izlaza. Da bi se otpadna toplotna energija iskoristila, potrebno je da otpadna toplota generiše toplu pomoćnu struju koja se može upotrebiti u postrojenju ponora toplote. Pošto je eksergija svake od potencijalnih TPS koje je moguće zameniti određena prilikom određivanja gubitka eksergije, primenom jednačine (3.6) određuje se integracioni potencijal. Vrednosti IP i HTPS, koje je najbolje generisati dati su u Tabeli 4.8.

Table 4.8 Podaci za integracioni potencijal HTPS

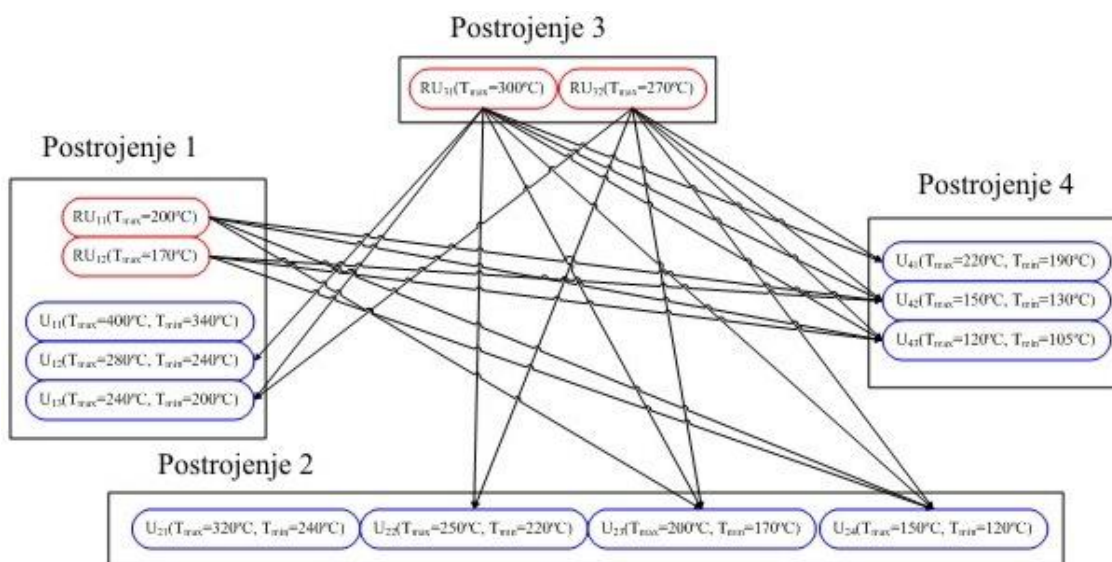
<i>Postrojenje broj</i>	$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	ΔH (kW)	<i>Vrsta Fluida</i>	$T_{in}(^{\circ}\text{C})$	$T_{out}(^{\circ}\text{C})$	P (bar)	IP
1	230	60	30000	Para	30	200	7.92	18.16
1	200	55	20000	Para	30	170	2.7	14.50
1	55	40	10000	Voda	30	45	1	1.94
2	210	60	20000	Para	30	170	2.7	1.00
3	330	60	25000	Para	30	300	33.48	15.78
3	300	70	20000	Para	30	270	23.2	14.93
4	180	50	12000	Para	30	150	4.76	1

Analizirajući Tabelu 4.8 može se reći da integracioni potencijal za tri razmenjivača toplote ima vrednost manju od dva, što ukazuje da je moguće samo malo povećanje kvaliteta toplote, tj. eksergije u odnosu na postojeću situaciju. U dva od tri slučaja u kojima je određen mali integracioni potencijal, vodena para se već generiše u razmenjivaču toplote između procesne struje i hladne pomoćne struje. Navedene tri opcije sa malim integracionim potencijalom biće isključene iz dalje analize. Ostale četiri veze koje pokazuju veliki integracioni potencijal se analiziraju u sledećem koraku.

4.3 Uspostavljanje veze između postrojenja

Pošto su iz dalje analize eliminisane veze sa malim integracionim potencijalom, u ovom koraku treba odrediti izvodljivost veza između novouspotavljenog razmenjivača, u kome se generiše HTPS, koja se povezuje sa postrojenjem koje predstavlja ponor toplote. Prema jednačinama (3.26) i (3.27) veza između novog razmenjivača u postrojenju izvora toplote i sistema pomoćnih struja u sistemu ponora toplote moguća je ako su maksimalna temperatura i pritisak HTPS veći ili jednaki od temperature i pritiska tople pomoćne struje u postrojenju ponora toplote. U slučaju kada su

tope pomoćne struje voda, vodena para ili toplo ulje, ako je ispunjen temperaturni uslov, tada je takođe ispunjen i uslov pritiska, jer se pritisak može podesiti upotrebom pumpi za sve navedene komponente. Veze između dva postrojenja uvek su izvodljive u odnosu na pritisak, ako su temperaturni zahtevi zadovoljeni. Odnosno, ako HTPS ima dovoljnu temperaturu da može da zameni TPS u postrojenju ponora toplote, tada se uzima da HTPS ima i neophodan pritisak koji zadovoljava zahteve TPS u postrojenju ponora toplote. Ova pretpostavka se može uzeti u obzir s obzirom na to da se pritisak HTPS može regulisati pumpama i drugim uređajima za promenu pritiska. Na Slici 4.6 prikazane su preostale izvodljive veze između postrojenja izvora i postrojenja ponora preko HTPS [128].



Slika 4.6 Izvodljive veze između postrojenja

Da bi odredili uticaj rastojanja na izvodljivost povezivanja preostalih veza, potrebne transportne temperature, temperature na ulazu u sistem energana postrojenja ponora toplote, se izračunavaju za HTPS prema jednačini (3.28). Pad temperature tokom transporta između postrojenja zavisi od kvaliteta HTPS. Pad temperature po jedinici dužine prikazan je u Tabeli 4.9 [120]:

Table 4.9 Promena temperature duž cevovoda po jedinici dužine

Temperaturni opseg, °C	Pad temperature po jedinicu dužine (°C /metar)
300-450	0.030
200-300	0.025
100-200	0.015

Vrednosti pada temperature po jedinici dužine određene su za različite vrednosti izolacije, tako da je srednji pad temperature po jedinici dužine konstanta vrednost u određenom temperaturnom intervalu. Nakon izračunavanja transportne temperature svaka od veza se ponovo revalorizuje primenom jednačine (3.28). Transportne temperature i izvodljivost svake veze prikazani su u Tabeli 4.10:

4.4 Određivanje maksimalnog iskorišćenja otpadne toplote

Konfiguracija energana industrijske zone ilustrovana je na Slici 4.1. Da bi se povećala proizvodnja električne energije deo TPS se zamenjuje sa HTPS, koja je generisana od otpadne toplote u postrojenju izvora toplote. Deo vodene pare veoma visokog pritiska, koji je služio za generisanje zamenjenog dela TPS i električne energije, upućuje se na kondenzujuće turbine. Na ovaj način se povećava proizvodnja električne energije usled većeg gradijenta pritiska u kondenzujućoj turbini, naspram protiv-potisne. Kvantitet smanjenja protoka pare na protiv-potisnoj turbini, kao i povećanje protoka na kondenzujućoj turbini, zavisi od karakteristika same turbine. Ova osobina sistema uvedena je u optimizaciju kroz parametar λ , koji predstavlja deo masenog protoka, kojem je dozvoljeno da bude povećan ili smanjen oko optimalnog masenog protoka kroz turbinu. Nakon što se utvrde izvodljive veze (poglavlje 4.3) izračunava se iskorišćenje viška toplote za maksimalnu proizvodnju električne energije rešavanjem optimizacionog problema (P1a), koji je izveden upotrebom jednačina od (3.29) do (3.35) Optimizacioni problem definisan jednačinom (P1a), klasifikuje se u tzv. mešovito celobrojni

linearni problem (MCLP) [128]. Definisani optimizacioni problem rešen je pomoću programskog paketa LINDO.

Tabela 4.10 Transportne temperature i izvodljiva povezivanja

Izvor	Ponor	Rastojanje (m)	$\Delta T_{i,j,k,l}$	Transportna	Izvodljivost
RU ₁₁	U ₂₃	1000	15	215	0
RU ₁₁	U ₂₄	1000	15	165	1
RU ₁₁	U ₄₂	900	13.5	163.5	1
RU ₁₁	U ₄₃	900	13.5	133.5	1
RU ₁₂	U ₂₄	1000	15	165	1
RU ₁₂	U ₄₂	900	13.5	163.5	1
RU ₁₂	U ₄₃	900	13.5	133.5	1
RU ₃₁	U ₁₂	700	17.5	297.5	1
RU ₃₁	U ₁₃	700	17.5	257.5	1
RU ₃₁	U ₂₂	800	20	270	1
RU ₃₁	U ₂₃	800	20	220	1
RU ₃₁	U ₂₄	800	12	162	1
RU ₃₁	U ₄₁	850	21.25	245.5	1
RU ₃₁	U ₄₂	850	12.75	162.75	1
RU ₃₁	U ₄₃	850	12.75	132.75	1
RU ₃₂	U ₁₃	700	17.5	257.5	1
RU ₃₂	U ₂₂	800	20	270	1
RU ₃₂	U ₂₃	800	12	212	1
RU ₃₂	U ₂₄	800	12	174	1
RU ₃₂	U ₄₁	850	21.25	241.25	1
RU ₃₂	U ₄₂	850	12.75	162.75	1
RU ₃₂	U ₄₃	850	12.75	132.75	1

gde je: RU_{ij} - broj postrojenja izvora toplote i , procesne struje j , a U_{kl} - broj postrojenja ponora toplote k , pomoćne struje l .

Optimizacijom je određeno da je upotrebom viška toplote moguće u datoj konfiguraciji energana proizvesti 84.22 MW, što je 5.7% više nego što se generiše kada integracija postrojenja nije uspostavljena [128]. Zahtevi za TPS se smanjuju za 4% upotrebom integracije. Rešenje optimizacionog problema (P1a) prikazano je u Tabelama (4.11) i (4.12).

$$\max \Phi = \sum_k \sum_l W_{k,l}$$

Sa ograničenjima

$$\sum_k \sum_l W_{k,l} \geq \Pi_k \quad \forall k \in P^K$$

$$\sum_l m_{k,l}^{turb} - m_k^{vap} = 0 \quad \forall k \in P^K$$

$$u_{k,l} \cdot m_{k,l}^{tmin} \leq m_{k,l}^{turb} \leq u_{k,l} \cdot m_{k,l}^{tmax} \quad \forall k \in P^K, l \in L_k \quad (P1a)$$

$$b_{i,j,k,l} \cdot m_{i,j,k,l}^{min} \leq m_{i,j,k,l} \leq b_{i,j,k,l} \cdot m_{i,j,k,l}^{max} \quad \forall i \in I_i, j \in J_j, k \in K_k, l \in L_l$$

$$\sum_k \sum_l m_{i,j,k,l} \left[Cp_L (q_{k,l}^{sat} - q_{in,i}) + \Delta H_{vap} (q_{k,l}^{sat}) + Cp_G (q_{k,l}^{gas} - q_{k,l}^{sat}) \right] \leq \Theta_{i,j} \quad \forall i \in P^I, j \in J_i$$

$$m_{k,l}^{ps} + \sum_l m_{i,j,k,l} - m_{k,l}^{turb} = 0 \quad \forall i \in P^I, j \in J_i, k \in P^K$$

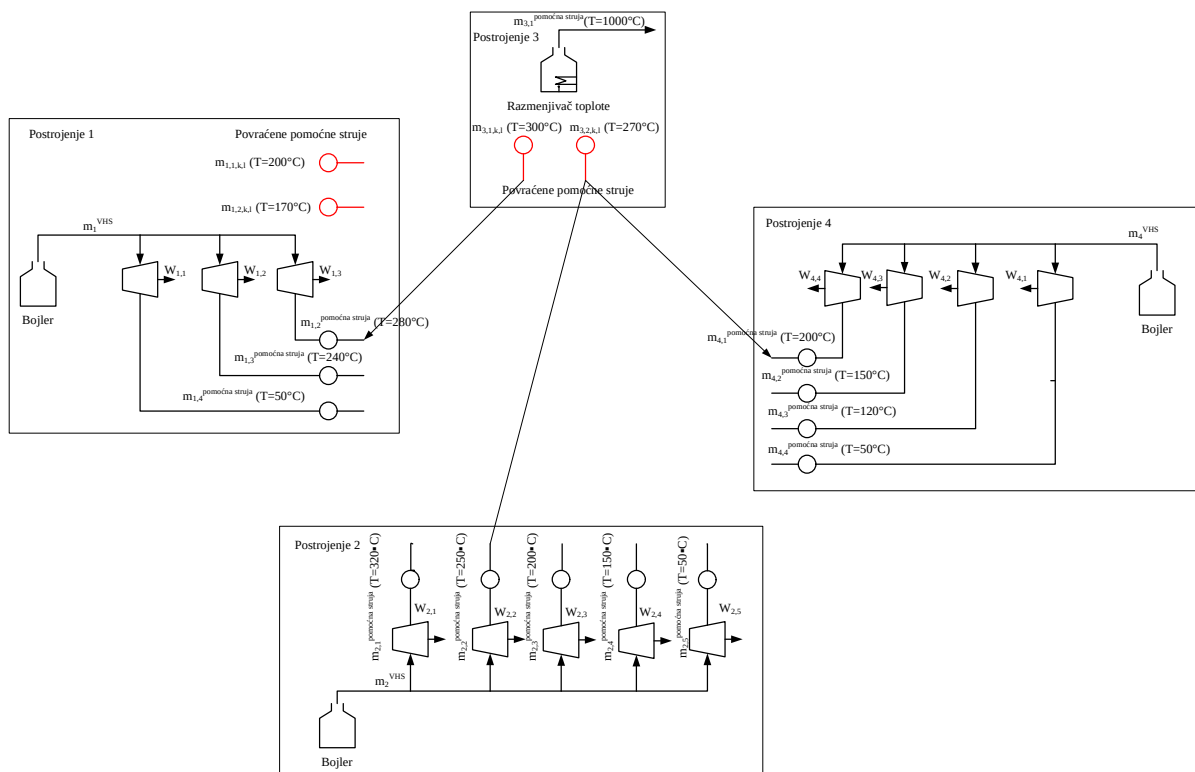
Tabela 4.11 Optimizovane vrednosti proizvodnje električne energije i masenog protoka za maksimalnu proizvodnju električne energije

Postrojenje	Turbina	Snaga (kW)	Maseni protok (kg/sec)
1	1	2493.9	10.90
	2	5455.9	14.55
	3	11685.3	12.00
2	1	2603.7	11.35
	2	5559.7	18.13
	3	4775.0	10.23
	4	8190.2	12.67
	5	16941.7	17.24
3	-	-	-
4	1	3149.9	8.00
	2	6952.4	11.46
	3	7135.0	10.22
	4	9279.5	9.60

Table 4.12 Rezultati optimizacije za dostizanje maksimalne proizvodnje električne energije

Veza	Tip pomoćne struje	Maseni protok (kg/s)	Toplota u procesnim razmenjivačima toplote (kW)	Povraćena toplota (kW)
3112	HP	2	5976.55	3681.6
3222	HP	2.87	8429.442	5334.144
3241	MP	1.6	4564.38	3261.6

Na osnovu rezultata iz Tabela 4.11 i 4.12, može se zaključiti da se najviše koristi otpadna toplota visokog kvaliteta koja generiše HTPS visokog kvaliteta. Ovo ponašanje je očekivano, jer se količina snage koja se može generisati u kondenzujućim turbinama veća nego u protiv-potisnim pri istom masenom protoku vodene pare. Količina proizvedene snage na protiv-potisnim i kondenzujućim turbinama zavisi od razlike pritiska na ulazu i izlazu iz turbine. Zamenom TPS visokog kvaliteta sa HTPS istog kvaliteta, smanjuje se protok pare vrlo visokog pritiska kroz protiv-potisne turbine, čiji se izlazni uslovi nalaze na uslovima TPS. Smanjenjem protoka kroz ove turbine, dolazi do smanjenja snage na njima, međutim, višak pare vrlo visokog pritiska može se propustiti kroz kondenzujuće turbine. Pošto se izlazni uslovi u kondenzujućim turbinama nalaze na uslovima vakuma, generisaće se više snage na njima, u odnosu na datu protiv-pritisnu turbinu pri istom protoku pare vrlo visokog pritiska, a zbog veće razlike pritiska na ulazu i izlazu u turbinu. Pri generisanju TPS visokog kvaliteta, generiše se manje snage na turbinama nego na turbinama koje generišu TPS manjeg kvaliteta, tako da se nameće zaključak zamene TPS visokog kvaliteta sa HTPS istog kvaliteta u cilju maksimizovanja snage na turbinama. Jednostavnije rečeno, što je TPS kvalitet proizveden u protiv-potisnoj turbini veći, to je veća i količina snage koja se može generisati njenom zamenom sa HTPS.



Slika 4.7 Konfiguracija industrijske zone sa povraćenim pomoćnim strujama za dobijanje maksimalne snage

Da bi se minimizovala potrošnja goriva na bojleru, koristi se isti princip kao i u slučaju maksimalne proizvodnje snage na turbinama, tako što se deo TPS zamenjuje sa HTPS koja se generiše od viška toplote u postrojenju izvora toplote. Fosilno gorivo sagoreva u kotlovima da bi se generisala para veoma visokog pritiska, koja se zatim koristi za proizvodnju električne energije i TPS. Količina goriva potrebna da bi se proizvela para veoma visokog pritiska, zavisi od vrste upotrebljenog goriva (prirodni gas, tečna goriva ili ugalj), količine vodene pare i efikasnosti kotla. Količina potrošenog goriva direktno je proporcionalan masenom protoku generisane vodene pare veoma visokog pritiska, pa je ušteda goriva kvantifikovana kroz smanjenje proizvodnje vodene pare vrlo visokog pritiska. Minimalna potrošnja goriva se određuje rešavanjem problema (P1b), koji je definisan jednačinama od (3.29) do (3.34) kao i jednačinom (3.36). Optimizacioni problem (P1b), klasifikovan je kao mešovito celobrojni linerani problem (MCLP), koji je rešen pomoću LINDO programskog paketa.

$$\max \Phi = \sum_{k \in P^K} m_k^{fuel} \propto \sum_{k \in P^K} m_k^{VHS}$$

Sa ograničenjima

$$\begin{aligned} \sum_k \sum_l W_{k,l} &= \Pi_k & \forall k \in P^K \\ u_{k,l} \cdot m_{k,l}^{tmin} &\leq m_{k,l}^{turb} \leq u_{k,l} \cdot m_{k,l}^{tmax} & \forall k \in P^K, l \in L_k \\ b_{i,j,k,l} \cdot m_{i,j,k,l}^{min} &\leq m_{i,j,k,l} \leq b_{i,j,k,l} \cdot m_{i,j,k,l}^{max} & \forall i \in I_i, j \in J_j, k \in K_k, l \in L_l \\ \sum_k \sum_l m_{i,j,k,l} \left[Cp_L (q_{k,l}^{sat} - q_{in,i}) + \Delta H_{vap} (q_{k,l}^{sat}) + Cp_G (q_{k,l}^{gas} - q_{k,l}^{sat}) \right] &\leq \Theta_{i,j} & \forall i \in P^I, j \in J_i \\ m_{k,l}^{ps} + \sum_l m_{i,j,k,l} - m_{k,l}^{turb} &= 0 & \forall i \in P^I, j \in J_i, k \in P^K \end{aligned} \quad (P1b)$$

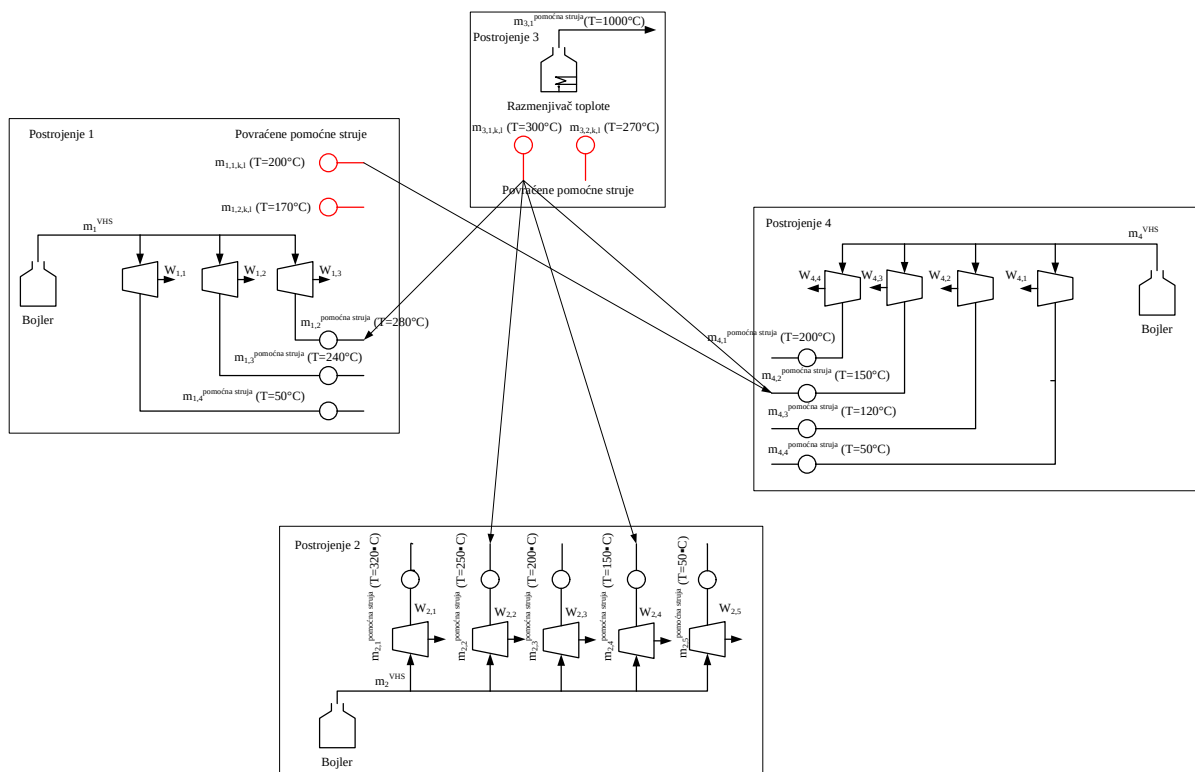
Optimizacijom je utvrđeno da je minimalna potrošnja goriva 9.7 kg/s, što je 6.6% manje nego što se sagoreva u početnoj konfiguraciji u energanama industrijskog kompleksa, pre energetske integracije, pri čemu je 10% zahteva za TPS zamenjeno HTPS [128]. Rešenja optimizacionog problema data su u Tabelama 4.13 i 4.14.

Tabela 4.13 Optimizovana proizvodnja snage i masenog protoka na turbinama pri minimalnoj potrošnji goriva

Postrojenje	Turbina	Snaga (kW)	Maseni protok (kg/sec)
1	1	2351.6	10.32
	2	4298.6	11.64
	3	11430.8	11.75
2	1	2603.7	11.35
	2	5124.2	16.80
	3	3762.1	8.18
	4	7617.9	11.84
	5	16941.7	17.24
3	-	-	-
4	1	3014.6	7.68
	2	6140.2	10.20
	3	7135.0	10.22
	4	9279.5	9.60

Tabela 4.14 Rezultati optimizacije pri minimalnoj potrošnji goriva

<i>Veza</i>	<i>Vrsta pomoćne struje</i>	<i>Maseni protok (kg/s)</i>	<i>Toplota u procesnom razmenjivaču (kW)</i>	<i>Povraćena toplota (kW)</i>
1142	LP	0.089	238.92	197.78
3112	HP	2.58	7709.75	4749.26
3122	HP	4.06	11910.29	7536.82
3124	LP	0.83	2235.67	1893.44
3142	LP	1.17	3144.29	2605.18



Slika 4.8 Konfiguracija industrijske zone sa povraćenim pomoćnim strujama za dobijanje minimalne potrošnje goriva

4.5 Projektovanje mreže za integraciju industrijskog kompleksa

Nakon utvrđivanja značajnih mogućnosti za upotrebom otpadne toplote u predhodnom koraku, u ovom koraku projektujemo mrežu kojom bi se višak toplote upotrebio za kogeneraciju toplote u električnu energiju.

Cilj je da se maksimizuje ukupni godišnji profit upotrebom viška toplote, tako što se maksimizuje proizvodnja snage ili se minimizuje potrošnja goriva. Funkcije cilja za optimizovanje proizvodnje snage ili potrošnje goriva se razlikuju. Optimizacioni problem za maksimizovanje proizvodnje snage na turbinama definiše se sledećom jednačinom:

$$\max GP = R_{el} - \frac{TCC}{SOL}$$

saograničenjima :

$$\begin{aligned} \sum_k \sum_l W_{k,l} &\geq \Pi_k && \forall k \in P^K \\ \sum_l m_{k,l}^{turb} - m_k^{vap} &= 0 && \forall k \in P^K \\ u_{k,l} \cdot m_{k,l}^{tmin} &\leq m_{k,l}^{turb} \leq u_{k,l} \cdot m_{k,l}^{tmax} && \forall k \in P^K, l \in L_k \\ b_{i,j,k,l} \cdot m_{i,j,k,l}^{min} &\leq m_{i,j,k,l} \leq b_{i,j,k,l} \cdot m_{i,j,k,l}^{max} && \forall i \in I_i, j \in J_j, k \in K_k, l \in L_l \\ \sum_k \sum_l m_{i,j,k,l} \left[Cp_L (q_{k,l}^{sat} - q_{in,i}) + \Delta H_{vap} (q_{k,l}^{sat}) + Cp_G (q_{k,l}^{gas} - q_{k,l}^{sat}) \right] &\leq \Theta_{i,j} && \forall i \in P^I, j \in J_i \\ m_{k,l}^{ps} + \sum_l m_{i,j,k,l} - m_{k,l}^{turb} &= 0 && \forall i \in P^I, j \in J_i, k \in P \end{aligned} \quad (P2a)$$

gde je: R_{el} – vrednost električne energije proizvedena usled povećanja proizvodnje električne energije (\$/year), TCC – ukupni kapitalni troškovi (\$) i SOL – predviđeni životni vek postrojenja.

Vrednost generisana usled povećanja proizvodnje snage je prikazana sledećim izrazom:

$$R_{el} (\$/year) = \sum_{k \in K^P} \sum_{l \in L^K} (Power_{k,l}^{new} - Power_{k,l}^{old}) \cdot Pr_{power} \quad (4.23)$$

gde su: $Power_{k,l}^{new}$ - električna energija proizvedena u industrijskom kompleksu kada je uspostavljena integracija između postrojenja (kWh/god), $Power_{k,l}^{old}$ - električna energija proizvedena u industrijskom kompleksu bez integracije postrojenja (kWh/god) i Pr_{power} - cena po kojoj se električna energija može prodati na tržištu.

Ukupni kapitalni troškovi mogu se izračunati preko jednačine (4.24).

$$TCC = \sum_{i \in I^P} \sum_{j \in J^I} \sum_{k \in K^P} \sum_{l \in L^K} b_{i,j,k,l} \cdot (Cost_{Hex_{i,j,k,l}} + Pcul_{i,j,k,l} \cdot L_{i,j,k,l}) \quad (4.24)$$

Cena električne energije iznosi 0.02 \$/kWh [120]. Operativni život integracione mreže je 10 godina. Cene toplih pomoćnih struje su sledeće [120]:

- Para niskog pritiska (ispod 180°C): 0.0025 \$/kg
- Para srednjeg pritiska (ispod 250°C): 0.006875 \$/kg

- Para visokog pritiska (iznad 250°C): 0.0075 \$/kg
- Para veoma visokog pritiska (510°C, 90 bara):

Kapitalni troškovi predstavljaju zbir cene cevovoda i cene razmenjivača toplote svih uspostavljenih veza. Kapitalni troškovi po jedinici dužine se izračunavaju kao [129]:

$$P_{cul_{i,j,k,l}} (\$/m) = A_1 \cdot wt_{cev} + A_2 \cdot D_{spoljasnji}^{0.48} + A_3 + A_4 \cdot D_{spoljasnji} \quad (4.25)$$

gde su: A_1 – cena cevi po jedinici težine (0.82 \$/kg), wt_{cev} – težina cevi po jedinici dužine (kg/m), A_2 – cena instalacije cevi (185\$/m^{0.48}), $D_{spoljasnji}$ – spoljašnji prečnik cevi (m), A_3 – fiksni kapitalni troškovi (6.8 \$/m) i A_4 – cena izolacije (295 \$/m).

Unutrašnji prečnik cevi $D_{unutrašnji}$ se izračunava prema jednačini (4.26):

$$D_{unutrašnji} = \sqrt{\frac{4 \cdot m_{i,j,k,l}}{u \cdot \rho_{i,j,k,l} \cdot p}} \quad (4.26)$$

$\rho_{i,j,k,l}$ – gustina HTPS koju je generisala procesna struja j u postrojenju i i koja se povezuje sa TPS lu postrojenju k (kg/m³) i u – brzina fluida u cevi (m/s).

Pretpostavka je da je brzina pare u cevima 45 m/s za srednji i visoki pritisak i 20 m/s za paru niskog pritiska [130]. Da bi se odredio spoljašnji prečnik i težina po jedinici dužine, pretpostavljamo da se para niskog i srednjeg pritiska transportuje kroz cevi od nerđajućeg čelika prečnika schedule 40, dok se para visokog pritiska transportuje cevima od nerđajućeg čelika prečnika schedule 80. Podaci iz ASME B36.19M - 2004 standarda za nerđajući čelik su regresirani da bi se dobile jednačine kojima je moguće izračunati spoljašnji prečnik i težinu cevi, gde je nezavisno promenljiva unutrašnji prečnik cevi [131]. Spoljašnji prečnik i težina cevi se izračunavaju prema sledećim jednačinama:

- Za prečnik schedule 40

$$D_{spoljasnji} (m) = 1.052 \cdot D_{unutrašnji} (m) + 0.005251, \quad \text{Schedule 40} \quad (4.27)$$

$$wt_{pipe} (kg / m) = 644.3 \cdot D_{unutrašnji}^2 (m)^2 + 72.5 \cdot D_{unutrašnji} (m) + 0.4611, \quad \text{Schedule 40} \quad (4.28)$$

- Za prečnik schedule 80

$$D_{\text{spoljašnji}}(m) = 1.101 \cdot D_{\text{unutrašnji}}(m) + 0.006349, \text{ Schedule 80} \quad (4.29)$$

$$wt_{\text{pipe}}(kg / m) = 1330 \cdot D_{\text{unutrašnji}}(m)^2 + 75.18 \cdot D_{\text{unutrašnji}}(m) + 0.9268, \text{ Schedule 80} \quad (4.30)$$

Cena razmenjivača toplote se izračunava kao [130]:

$$Cost_Hex_{i,j,k,l}(\$) = 11000 + 150 \cdot A_{i,j,k,l} \quad (4.31)$$

gde je: $A_{i,j,k,l}$ — površina razmenjivača toplote za toplotnu razmenu (m^2). Površina razmenjivača toplote se izračunava na osnovu sledeće jednačine:

$$A_{i,j,k,l} = \frac{Q_{i,j,k,l}}{K_{i,j,k,l} \Delta T_{\ln,i,j,k,l} FT_{i,j,k,l}} \quad (4.32)$$

gde su: $K_{i,j,k,l}$ — koeficijent prenosa toplote ($kW/m^2/K$), $\Delta T_{\ln,i,j,k,l}$ — srednja logaritamska razlika temperatura (K), $FT_{i,j,k,l}$ — korekcionni faktor, koji se izračunava na osnovu reference [122]. Srednji koeficijenti prolaza toplote za svaki razmenjivač toplote, prikazani su u Tabeli 4.15.

Tabela 4.15 Koeficijenti prolaza toplote

Izvor	Ponor	K (W/m ² /K)
RU ₁₁	U ₂₃	677
RU ₁₁	U ₂₄	1125
RU ₁₁	U ₄₂	985
RU ₁₁	U ₄₃	602
RU ₁₂	U ₂₄	837
RU ₁₂	U ₄₂	794
RU ₁₂	U ₄₃	793
RU ₃₁	U ₁₂	898
RU ₃₁	U ₁₃	765
RU ₃₁	U ₂₂	921
RU ₃₁	U ₂₃	967
RU ₃₁	U ₂₄	1067
RU ₃₁	U ₄₁	1133
RU ₃₁	U ₄₂	870
RU ₃₁	U ₄₃	670
RU ₃₂	U ₁₃	1079
RU ₃₂	U ₂₂	818
RU ₃₂	U ₂₃	698
RU ₃₂	U ₂₄	698
RU ₃₂	U ₄₁	1003
RU ₃₂	U ₄₂	812
RU ₃₂	U ₄₃	677

Rezultujući problem sadrži celobrojne vrednosti binarne promenjive i nelinearne članove u jednačini za izračunavanje troškova uspostavljanjem veze između postrojenja izvora i ponora toplote.

Optimizacijom navedenog problema, dobija se da ukupni godišnji profit preko iskorišćenja otpadne toplote iznosi 349,105.00 \$. Usled energetske integracije dolazi do povećanja proizvodnje električne energije koja iznosi 4522 kW ili 5.7% više nego što proizvode energane u industrijskom kompleksu [128]. Ukupna zarada povećanjem proizvodnje električne energije iznosi 716,360.00 \$. Optimalna ekonomska mreža dostiže skoro maksimalnu iskorišćenost otpadne toplote, koja je određena u koraku 4., ali su veze različite. Rezultati optimizacije

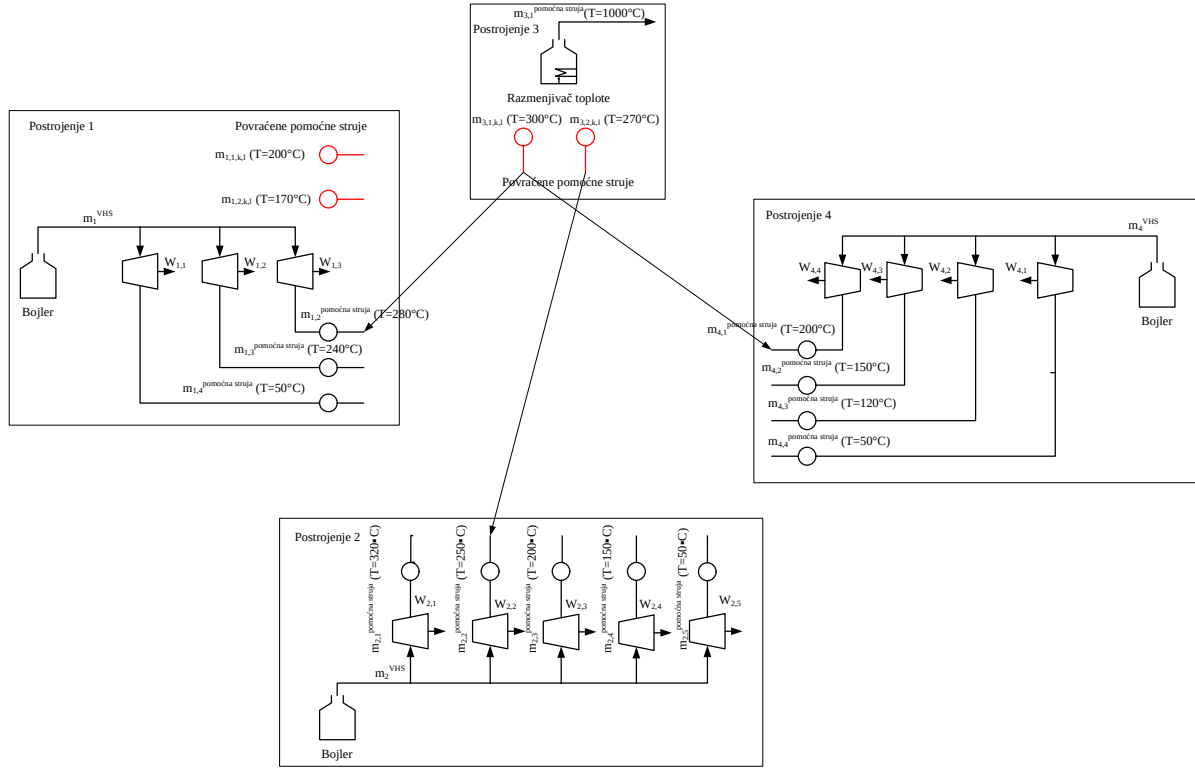
prikazani su u Tabelama 4.16 i 4.17. Optimalna integraciona mreža u slučaju maksimizovanja proizvodnje električne energije prikazana je na Slici 4.9.

Tabela 4.16 Optimizovana proizvodnja snage i masenog protoka na turbinama pri maksimalnoj proizvodnji snage i minimalnim ukupnim troškovima

<i>Postrojenje</i>	<i>Turbina</i>	<i>Snaga (kW)</i>	<i>Maseni protok (kg/s)</i>
1	1	2493.9	10.90
	2	5455.9	14.55
	3	11685.3	12.00
2	1	2603.7	11.35
	2	5559.7	18.13
	3	4775.0	10.23
	4	8190.2	12.67
	5	16941.7	17.24
3	-	-	-
4	1	3149.9	8.00
	2	6952.4	11.46
	3	7135.0	10.22
	4	9279.5	9.60

Tabela 4.17 Rezultati optimizacije za maksimizovanje snage i minimalnim ukupnim troškovima

<i>Veza</i>	<i>Vrsta pomoćne struje</i>	<i>Maseni protok (kg/s)</i>	<i>Cena cevovoda, \$</i>	<i>Cena razmenjivača toplote, \$</i>
3112	HP	2	636,581	546,983
3141	MP	1.6	900,754	260,637
3222	HP	2.87	911,094	416,590



Slika 4.9 Konfiguracija industrijskog kompleksa sa povraćenim pomoćnim strujama za dobijanje maksimalne snage i minimalnih ukupnih troškova

Optimizacioni problem za minimalnu potrošnju goriva definisan je sledećom jednačinom:

$$\max GP = R_{VHS} - \frac{TCC}{SOL}$$

Sa ograničenjima

$$\sum_k \sum_l W_{k,l} = \Pi_k$$

$$\forall k \in P^K$$

$$u_{k,l} \cdot m_{k,l}^{tmin} \leq m_{k,l}^{turb} \leq u_{k,l} \cdot m_{k,l}^{tmax}$$

$$\forall k \in P^K, l \in L_k \quad (P2b)$$

$$b_{i,j,k,l} \cdot m_{i,j,k,l}^{min} \leq m_{i,j,k,l} \leq b_{i,j,k,l} \cdot m_{i,j,k,l}^{max}$$

$$\forall i \in I_i, j \in J_j, k \in K_k, l \in L_l$$

$$\sum_k \sum_l m_{i,j,k,l} \left[C_{pL} (q_{k,l}^{sat} - q_{in,i}) + \Delta H_{vap} (q_{k,l}^{sat}) + C_{pG} (q_{k,l}^{gas} - q_{k,l}^{sat}) \right] \leq \Theta_{i,j} \quad \forall i \in P^I, j \in J_i$$

$$m_{k,l}^{ps} + \sum_l m_{i,j,k,l} - m_{k,l}^{turb} = 0$$

$$\forall i \in P^I, j \in J_i, k \in P^K$$

Vrednost koja se dobija usled smanjenja u potrošnji goriva se izračunava na osnovu sledeće jednačine:

$$R_{VHS} (\$/year) = \sum_{k \in K^p} \sum_{l \in L^k} \left((m_{k,l}^{VHS})^{old} - (m_{k,l}^{VHS})^{new} \right) \cdot Pr_{VHS} \quad (4.31)$$

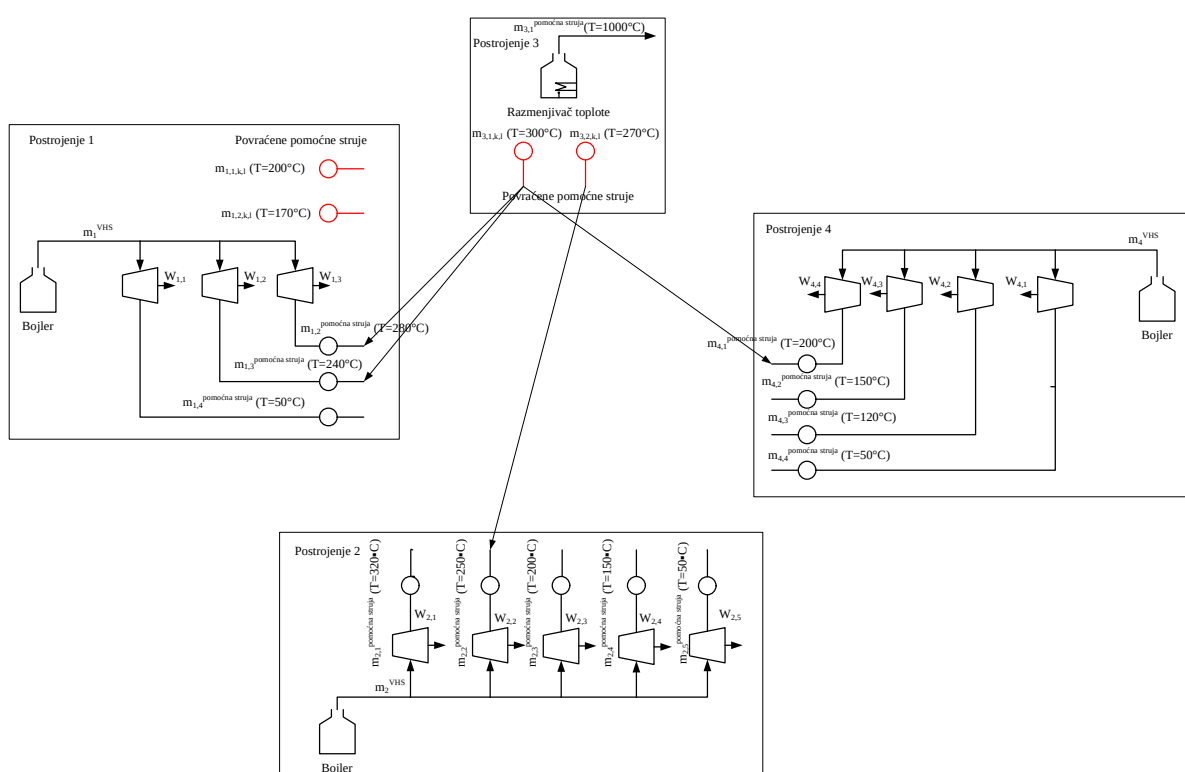
gde su: R_{VHS} – vrednost pare vrlo visokog pritiska proizvedena usled smanjene proizvodnje pare vrlo visokog pritiska (\$/god), $(m_{k,l}^{VHS})^{old}$ – maseni protok pare vrlo visokog pritiska pre energetske integracije, $(m_{k,l}^{VHS})^{new}$ – maseni protok pare vrlo visokog pritiska nakon integracije i Pr_{VHS} – cena po kojoj se para vrlo visokog pritiska može nabaviti na tržištu.

Rezultujući problem sadrži celobrojne vrednosti binarne promenjive i nelinearne članove u jednačini za izračunavanje troškova uspostavljenih veza.

Optimizacija pokazuje da ukupan godišnji profit (GP) iznosi 1,091,557.00 \$ i on se dostiže kroz iskorišćenje otpadne toplote, odnosno njenim korišćenjem u procesu. Smanjenjem proizvodnje pare veoma visokog pritiska iznosi 7.7 kg/s ili 5.2% manje nego što se trenutno proizvodi u energanama industrijskog kompleksa [128]. Ukupan profit koji se ostvaruje smanjenjem generisanja vodene pare veoma visokog pritiska iznosi 1,651,251.00 \$. Ekonomski optimalna integraciona mreža dostiže 98.7% od minimalnog mogućeg smanjenja u potrošnji goriva, određenog u koraku 4 [128]. Rezultati optimizacije su prikazani u Tabelama (4.18) i (4.19). Optimalna integraciona mreža razmenjivača toplote za minimalnu potrošnju goriva prikazana je na Slici (4.10).

Table 4.18 Optimizovana proizvodnja snage i masenog protoka na turbinama pri minimalnoj potrošnji goriva i minimalnim ukupnim troškovima

Postrojenje	Turbina	Snaga (kW)	Maseni protok (kg/s)
1	1	2351.6	10.32
	2	4298.6	11.64
	3	11430.8	11.75
2	1	2603.7	11.35
	2	5124.2	16.80
	3	4775.0	10.23
	4	8190.2	12.67
	5	15356.50	15.71
3	-	-	-
4	1	3014.6	7.68
	2	6952.4	11.46
	3	7135.0	10.22
	4	8467.2	8.80



Slika 4.10 Konfiguracija industrijskog kompleksa sa povraćenim pomoćnim strujama za dobijanje minimalne potrošnje goriva i minimalnih ukupnih troškova

Tabela 4.19 Rezultati optimizacije pri minimalnoj potrošnji goriva i minimalnim ukupnim troškovima

Veza	Vrsta pomoćne struje	Maseni protok (kg/s)	Cena cevovoda, \$	Cena razmenjivača toplote, \$
3112	HP	2.58	689,525	673,592
3113	HP	2.91	928,060	457,679
3141	MP	1.92	955,886	290,765
3222	HP	4.20	1,043,378	558,044

5. Zaključak

Energetska integracija je jedan od najefikasnijih načina povećanja energetske efikasnosti. Do sada su razvijene metode za energetske integracije procesa i postrojenja. Ove metode dovele su do revolucije u smanjenju korišćenja i potrošnje energije kako u procesima tako i u postrojenjima. Ovo su glavni razlozi zbog kojeg je nastavljeno proučavanje energetske integracije. U ovoj doktorskoj disertaciji predstavljena je energetska integracija industrijskog kompleksa kao nastavak razvijanja energetske integracije.

Energetska integracija industrijskog kompleksa koja je razvijena sastoji se iz sledećih celina:

- (i) Prikupljanje podataka
- (ii) Određivanje izvodljivih veza između struja
- (iii) Određivanje moguće uštede energije u industrijskom kompleksu pri maksimizovanju proizvodnje snage na turbinama i minimizovanju potrošnje goriva na kotlovima
- (iv) Određivanje ukupnog godišnjeg profita i moguće uštede energije u industrijskom kompleksu pri maksimizovanju snage na turbinama i minimizovanju potrošnje goriva na kotlovima.

Pri razvijanju metode za energetske integracije industrijskog kompleksa korišćen je model Varbanova i autora [123] za modelovanje turbina. Takođe, različiti optimizacioni modeli su korišćeni za određivanje maksimalne proizvodnje snage na turbinama i minimizovanju potrošnje goriva, kao i za određivanje maksimalne proizvodnje snage na turbinama i minimalne potrošnje goriva na kotlu pri maksimizovanju ukupnog godišnjeg profita. Pri određivanju maksimalnog ukupnog godišnjeg profita uzeti su u obzir i kapitalni troškovi pri ovakvoj integraciji, koji se sastoje od cene dodatnih razmenjivača toplote i cevovoda, da bi se odredila ekonomski najpovoljnija konfiguracija mreže.

Dobijeni rezultati su pokazali značajnu mogućnost uštede energije u industrijskim kompleksima. Za datu studiju slučaja pokazano je da se pri maksimizovanju snage na turbinama može proizvesti dodatnih 84.22 MW snage pomoću viška toplote, što predstavlja 5.7 % više snage nego što se generiše kada integracija postrojenja nije uspostavljena [128]. Zahtevi za TPS se smanjuju za 4 % upotrebom integracije. Zatim, pri minimizovanju potrošnje goriva na bojleru pokazano je da je minimalna potrošnja goriva u industrijskom kompleksu 9.7 kg/s, što je 6.6 % manje nego

što se sagoreva u početnoj konfiguraciji industrijskog kompleksa, pre energetske integracije [128]. Ovakav rezultat pokazuje da se 10 % zahteva za TPS može zameniti sa HTPS. Pri projektovanju mreže za integraciju industrijskog kompleksa pri maksimizovanju ukupnog godišnje profita, upotrebom viška toplote, postoji značajan potencijal za uštedu energije prilikom maksimizovanja snage na turbinama i minimizovanju potrošnje goriva na kotlu. Rezultati su pokazali da je ukupni godišnji profit pri maksimizovanju snage na turbinama 349,105.00 \$, odnosno dolazi do povećanja proizvodnje snage na turbinama za 4522 kW, ili za 5.7 % više nego što proizvedu energane u industrijskom kompleksu [128]. Takođe, ukupni godišnji profit pri minimizovanju potrošnje goriva na kotlu iznosi 1,091,577.00 \$, ili smanjenje proizvodnje pare veoma visokog pritiska od 7.7 kg/s, odnosno 5.2 % manje nego što se trenutno proizvodi u energanama industrijskog kompleksa [128].

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se upotrebom predložene metode za energetske integracije industrijskih kompleksa može značajno povećati energetska efikasnost industrijskih kompleksa, kao i smanjenje upotrebe energije u njima.

Reference

1. Energy Information Administration (EIA), Changes in Energy Intensity in the Manufacturing Sector 1985-1991: Manufacturing Energy Consumption Survey, Washington D.C., United States, 1995
2. S. L. Freeman, M.J. Niefer, J.M. Roop, Measuring Industrial Energy Efficiency: Physical Volume Versus Economic Value, Pacific Northwest National Laboratory (PNNL-11435), 1996
3. Asia Pacific Energy Research Centre (APEREC), Energy Efficiency Indicators for Industry in the APEC Region, Tokyo, Japan, 2000
4. IEA/CEFIC (2007), Feedstock Substitutes, Energy Efficient Technology and CO₂ Reduction for Petrochemical Products, Workshop Proceedings, IEA, Paris, France, 12-13 December 2006
<http://www.iea.org/Textbase/work/2006/petrochemicals/proceedings.pdf>
5. American Chemistry Council (2005), The Ethylene Chain, 2005
www.americanchemistry.com
6. R. Heinen, E. Johnson, Efficient Technology and CO₂ Reduction for Petrochemical Products, IEA/CEFIC Workshop Proceedings: Feedstock Substitutes, Energy Efficient Technology and CO₂ Reduction for Petrochemical Products, Paris, France, 2006
7. J. Beer, E. Worrell, K. Blok, Future Technologies for Energy-efficient Iron and Steel Making, Ann. Rev. Energy Environm, 23 (1998) 123-205
8. (International Iron and Steel Institute, World Steel in Figures, Brussels, Belgium, 2005
9. H. Schoenberger, BREF on the Production of Iron and Steel - Conclusion on BAT, 2000
http://www.ecologic-events.de/sevillal/en/documents/Schoenberger_en.PDF
10. J. Wei, *Practices of Lowering Energy Use for Iron Making System*, Energy Conservation and Environmental Protection, 5 (2006)

11. K. Radikha, M. Mitra, *Sponge Iron Industry are Killing Fields*, 2006
[http:// www.hatch.ca/Sustainable Development/Projects/World%20Cement%20Paper.pdf](http://www.hatch.ca/Sustainable/Development/Projects/World%20Cement%20Paper.pdf).
12. Natural Resources Canada (NRCAN)/ Canadian Steel Producers Association (CSPA)
 , *Benchmarking Energy Intensity in the Canadian Steel Industry*, Ottawa,
 Canada, 2007
13. International Energy Agency (IEA), *Coal Statistics*, OECD/IEA, Paris, France, 2005
14. CISA (2005b), *Iron and Steel Yearbook 2005*, ISBN 1003-9368, Beijing, China, 2005
15. P. Diemer, i autori,, *Potentials for Utilisation of Coke Oven Gas in Integrated
 Iron and Steel Works*, *Stahl und Eisen* 124,7 (2004), 21-30
16. Battelle, *Toward a Sustainable Cement Industry. Climate Change*, WBCSD,
 Geneva, 2002
<http://www.wbcsd.org>
17. R. G. C. Beerkens, J. van Limpt, *Energy Efficiency Benchmarking of Class furnaces*, Paper
 presented at the 62nd Conference on Class Problems, University of
 Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, United States, 2001
18. *EC Draft Reference Document on Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing
 Industry*, European Commission, *DG JRC*, 2006
<http://www.epa.ie/>
19. Y. Cui,, *Estimation of Energy Consumption and CO₂ Emission in Chinese Building Materials
 Industry in 2006*, Institute of Technical Information for the Building Materials Industry of
 China (ITIBMIC), Beijing, China, 2007
20. Japan Cement Association (JCA), *Cement Industry's Status and Activities for GHG
 Emissions Reduction in Japan*, presentation to the IEA-WBCSD Workshop "Energy
 Efficiency and CO₂ Emission Reduction Potentials and Policies in the Cement Industry",
 IEA, Paris, France, September 2006

21. Price, Prospects for Efficiency Improvements in China's Cement Sector, Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), presentation to the IEA-WBCSD Workshop "Energy Efficiency and CO₂ Emission Reduction Potentials and Policies in the Cement Industry", IEA, Paris, France, September 2006
22. European Commission (EC), Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries, 2001

<http://www.infomil.nl/legsys/bref/cement.pdf>
23. Confederation of European Paper Industries (CEPI), Special Recycling Statistics. Brussels, Belgium, 2001
24. I. Francis, Energy Cost Reduction in the Pulp and Paper Industry - An Energy Benchmarking Perspective, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada, 2002
25. European Recovered Paper Council (ERPC), European Declaration on Paper Recycling 2006-2010, Brussels, Belgium, 2006
26. IEA/ IETS, Recommended Methods for Energy Reporting in Pulp and Paper Industry, Summary Report, Annex XII: Assessment of Life-Cycle-Wide Energy-Related Environmental Impacts in the Pulp and Paper Industry, IEA Programme for Advanced Energy-Efficient Technologies in the Pulp and Paper Industry, 1999
27. Paprican, Energy Cost Reductions in the Pulp and Paper Industry, An Energy Benchmarking Perspective, Natural Resources Canada, Ottawa, Canada, 2002
28. A. Whiteman, Recent Trends and Developments in Global Markets for Pulp and Paper, United Nations Food and Agricultural Organization, Rome, Italy, 2005
29. Worrell, Opportunities to Improve Energy Efficiency in the US Pulp and Paper Industry, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, United States, 2001
30. European Commission (EC), IPPC Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Metals Industry, European Commission, Brussels/Seville, December 2001

31. Department of Industry Science and Resources (ISR) (, Energy Efficiency Best Practices in the Australian Aluminium Industry, ISBN 0 642 72041 X, Canberra, Australia, 2000
32. International Aluminium Institute (IAI), Life Cycle Assessment of Aluminium: Inventory Data for the Worldwide Primary Aluminium Industry, IAI, London, United Kingdom, 2003
33. US DOE, Improving Steam System Performance: A Sourcebook for Industry, prepared by Lawrence Berkeley National Laboratory and Resource Dynamics Corporation, Washington, D.C., United States, D0E/G0-102004-1868, 2004

http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/techpubs_steam.html
34. Masso, A. H. Masso; D. F. Rudd, The Synthesis of System Designs— II. Heuristic Structuring, *AIChE J*, 75 (1969) 10-17
35. H. Ten Broeck, Economic Selection of Exchanger Sizes, *Ind. Eng. Chem*, 36 (1944) 64-67
36. G. Westbrook, Use this Method to Size Each Stage for Best Operation, *Hydrocarbon Process. Pet. Refin*, 40 (1961) 201 -206
37. C. S Hwa, *Mathematical Formulation and Optimization of Heat Exchanger Networks Using Separable Programming*, *AIChE— IChemE Symposium Series 4*; *AIChE: New York*, 1965; 101 — 106
38. D. F. Rudd, The Synthesis of System Designs: I. Elementary Decomposition Theory, *AIChE J*, 14 (1968), 343-349
39. M. G. Kesler, R. O. Parker, Optimal Networks of Heat Exchange, *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, 65 (1969) 111-120
40. T. Gundersen, L. Naess, The Synthesis of Cost Optimal Heat Exchanger Networks, *Comput. Chem. Eng.*, 12 (1988) 503-530
41. R. L. McGalliard, A. W. Westerberg, Structural Sensitivity Analysis in Design Synthesis, *Chem. Eng. J.*, 4 (1972) 127—138

42. T. Umeda, J. Itoh, K. Shiroko, Heat Exchange System Synthesis, *Chem. Eng. Prog.*, 74 (1978) 70-76
43. B. Linnhoff, J. R. Flower, Synthesis of Heat Exchanger Networks—I. Systematic Generation of Energy Optimal Networks, *AIChE J.*, 24 (1978) 633-642
44. B. Linnhoff, J. R. Flower, Synthesis of Heat Exchanger Networks—II. Evolutionary Generation of Networks with Various Criteria of Optimality, *AIChE J.*, 24 (1978) 642-654
45. J. Cerda, A. W. Westerberg, D. Mason, B. Linnhoff, Minimum Utility Usage in Heat Exchanger Network Synthesis, *Chem. Eng. Sci.*, 38 (1983) 373-387
46. J. Cerda, A. W. Westerberg, Synthesizing Heat Exchanger Networks Having Restricted Stream/Stream Matches Using Transportation Problem Formulations, *Chem. Eng. Sci.*, 38 (1983) 1723-1740
47. S. A. Papoulias, I. E. Grossmann, A Structural Optimization Approach in Process Synthesis—II. Heat Recovery Networks, *Comput. Chem. Eng.*, 7 (1983) 707-721
48. B. Linnhoff, D. R. Vredeveld, Pinch Technology Has Come of Age, *Chem. Eng. Prog.*, 80 (1984) 33-40
49. T. N. Tjoa, B. Linnhoff, Using Pinch Technology for Process Retrofit, *Chem. Eng.*, 93 (1986) 47-60
50. Y. Li, R. L. Motard, Optimal Pinch Approach Temperature in Heat-Exchanger Networks, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 25 (1986) 577-581
51. C. A. Floudas, A. R. Ciric, I. E. Grossmann, Automatic Synthesis of Optimum Heat Exchanger Network Configurations, *AIChE J.*, 32 (1986) 276-290
52. E. Rev, Z. Fonyo, Hidden and Pseudo Pinch Phenomena and Relaxation in the Synthesis of Heat-Exchange Networks, *Comput. Chem. Eng.*, 10 (1986) 601—607
53. E. Rev, Z. Fonyo, Additional Pinch Phenomena Providing Improved Synthesis of Heat Exchange Networks, *Hung. J. Ind. Chem.*, 14 (1986) 181-201

54. S.A. Jones, Methods for the Generation and Evaluation of Alternative Heat Exchanger Networks, Ph.D. Dissertation ETH Zürich, Zürich, 1987
55. X. Yuan, L. Pibouleau, S. Domenech, Experiments in Process Synthesis via Mixed-Integer Programming, *Chem. Eng. Process.*, 25 (1989) 99-116
56. T. F. Yee, I. E. Grossmann, Simultaneous Optimization Models for Heat Integration—II. Heat Exchanger Network Synthesis, *Comput. Chem. Eng.*, 14 (1990) 1165-1184
57. A. R. Ciric, C.A. Floudas, Heat Exchanger Network Synthesis without Decomposition, *Comput. Chem. Eng.*, 15 (1991) 385-396
58. I.C. Kemp, Pinch Analysis and Process Integration: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, Butterworth-Heinemann, 2007
59. E.C. Hohman, *Optimum Networks of Heat Exchange*, PhD Thesis, University of Southern California, 1971
60. B. Linnhoff B, J. R. Flower, Synthesis of Heat Exchanger Networks I. Systematic Generation of Energy Optimal Networks , *AIChE J*, 24(1978), 633-642
61. B. Linnhoff, D. W. Townsend, D. Boland, G. F. Hewitt, B. E. A. Thomas, A. R. Guy, R.H. Marsland, *A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*, IChemE, UK, 1982
62. J. Itoh, K. Shiroko, T. Umeda, Extensive Application of the T - Q Diagram to Heat Integrated System Synthesis, *International Conference on Proceedings Systems Engineering* , Kyoto, 1982
63. D. W. Townsend, B. Linnhoff, Heat and Power Networks in Process Design, *AIChE J*, 29 (1983) 742
64. E. C. Hohman, *Optimum Networks for Heat Exchange*, PhD Thesis, University of Southern California, 1971
65. D. W. Townsend, B. Linnhoff, *Surface Area Targets for Heat Exchanger Networks*, IChemE Annual Research Meeting, Bath, UK, 1984

66. B. Linnhoff, S. Ahmad, Cost Optimum Heat Exchanger Networks - I. Minimum Energy and Capital Using Simple Models for Capital Cost, *Comp Chem Eng*, 14 (1990) 729-750
67. B. Linnhoff, E. Hindammarsh, The Pinch Design Method of Heat Exchanger Networks, *Chem Eng Sci*, 38 (1983) 745-763
68. B. Linnhoff, D.W Townsend, D. Boland, G. F. Hewitt, B. E. A Thomas , A. R. Guy, R. H. Marsland, *A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*, IChemE Rugby, UK, 1982
69. R. M. Wood, R. J. Wilcox, I. E. Grossmann, A note on the minimum number of units for heat exchanger network synthesis, *Chemical Eng. Communications*, 39 (1985) 371
70. T. F. Yee, I. E. Grossmann, Z. Kravanja, Simultaneous optimization models for heat integration—I. Area and energy targeting and modeling of multistream exchangers. *Comp, and Chem. Engng.*, 14 (1990) 1165
71. J. J. J Chen, Letter to the Editor: Comments on improvement on a replacement for the logarithmic mean, *Chem. Engng. Sci.*, 42 (1987) 2488
72. M. M. Daichendt, I. E. Grossmann, Preliminary screening procedure for the MINLP synthesis of process systems. II. Heat exchanger networks, *Comp. and Chem. Engng.*, 18 (1994) 679
73. J. Cerda, A. W. Westerberg, D. Mason, B. Linnhoff, Minimum utility usage in heat exchanger network synthesis—A transportation problem, *Chem. Engng Sci.*, 38 (1983) 373
74. T. Gundersen, I. E. Grossmann, Improved optimization strategies for automated heat exchanger network synthesis through physical insights. *Comp, and Chem. Engng.*, 14 (1990) (9) 925
75. C. A. Floudas, A. R. Ciric, Strategies for overcoming uncertainties in heat exchanger network synthesis, *Comp. and Chem. Engng.*, 13 (1989) (10) 1117
76. V. R. Dhole, B. Linnhoff, Total Site Targets for Fuel, Cogeneration, Emissions and Cooling, ESCAPE - II Conference, Toulouse, France, 1992
77. K. Raissi, Total Site Integration, PhD Thesis, UMIST, UK, 1994
78. R. Smith, Chemical Process Design and Integration, John Wiley & Sons Ltd, 2005

79. J. Klemes V. R. Dhole, K. Raissi, S. J. Perry, L. Puigjaner, Targeting and Design Methodology for Reduction of Fuel, Power and CO₂ on Total Sites, *J Applied Thermal Eng*, 17 (1997) 993
80. L.T. Biegler, I.E. Grossmann, A.W. Westerberg, Systematic methods of chemical process design, Person Education, 1997
81. C. A. Floudas, P. M. Pardalos, Encyclopedia of Optimization, Springer Science+Business Media, 2009
82. C. A. Floudas, Nonlinear and Mixed-Integer Optimization, Oxford University Press, 1995
83. <http://www.ampl.com/>
84. <http://www.gams.com/>
85. http://www.lindo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=2&
86. http://www.lindo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=2&
87. <http://www.tomopt.com/tomlab>
88. I. Allison, N. L. Bindoff R. A. Bindshadler P. M. Cox, N. de Noblet, M. H. England i autori, The Copenhagen diagnosis, The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sidney, 2009
http://www.ccrcc.unsw.edu.au/Copenhagen/Copenhagen_Diagnosis_HIGH.pdf (September 2012)
89. IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Valencia; 2007.
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm (September 2012)
90. Smith JB, Schneider SH, Oppenheimer M, Yohe GW, Hare W, Mastrandrea MD, Patwardhan A, Burton A, Corfee-Morlot J, Magadza CHD, Fussel HM, Pittcock AB, Rahman A, Suarez A, van Ypersele JP, Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) “reasons for concern”. PNAS 2008:

<http://www.pnas.org/content/early/2009/02/25/0812355106.full.pdf+html> (September 2012)

91. C. Le Quéré, M. R. Raupach, J. G. M. Canadell, Trends in the sources and sinks of carbon dioxide, *Nature Geoscience*, 2 (2009) 831-836
92. IEA, “Tracking industrial energy efficiency and CO2 emissions”, http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/tracking_emissions.pdf, 2007
93. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/contents.html (September 2012)
94. J. A. Stanislaw, Climate changes everything: the dawn of the green economy, Deloitte , 2008 http://www.cleantechsandiego.org/reports/us_er_Stanislaw_Climate%20Changes%20Everything_01-15-08%20FINAL.pdf (September 2012)
95. P. A. Enkvist, T. Naucclér, J. M. Oppenheim, Business strategies for climate change, *The McKinsey Quarterly* 2008, https://www.mckinseyquarterly.com/Business_strategies_for_climate_change_2125 (September 2012)
96. S. Bonini, J. M. Oppenheim, The next environmental issue for business, *The McKinsey Quarterly* August, 2010 https://www.mckinseyquarterly.com/The_next_environmental_issue_for_business_McKinsey_Global_Survey_results_2651 (September 2012)
97. The Goldman Sachs Group, Change is coming: A framework for climate change – a defining issue of the 21st century, 2009, <http://www.goldmansachs.com/our-thinking/topics/gs-sustain/gs-sustain/climate-change-research-pdf.pdf> (September 2012)
98. WCED (World Commission on Environment and Development), Our common future (The Brundtland Report), New York, 1987, Oxford University Press

99. J. Elkington, Towards the sustainable corporation: win-win-win business strategies for sustainable development, *Calif Manage*, 36 (1994) 90–100
100. J. A. Stanislaw, Climate changes everything: the dawn of the green economy, Deloitte, http://www.cleantechsandiego.org/reports/us_er_Stanislaw_Climate%20Changes%20Everything_01-15-08%20FINAL.pdf, 2008 (September 2012)
101. P. A. Enkvist, T. Nauc  r, J. M. Oppenheim, Business strategies for climate change, *The McKinsey Quarterly*, 2008
https://www.mckinseyquarterly.com/Business_strategies_for_climate_change_2125, [September 2012]
102. S. Bonini, J. M. Oppenheim, The next environmental issue for business, *The McKinsey Quarterly*, 2010
https://www.mckinseyquarterly.com/The_next_environmental_issue_for_business_McKinsey_Global_Survey_results_2651, [September 2012].
103. The Goldman Sachs Group, Change is coming: a framework for climate change a defining issue of the 21st century, 2009
<http://www.goldmansachs.com/ourthinking/topics/gs-sustain/gs-sustain/climate-change-research-pdf.pdf>, [September 2012]
104. V. R. Dhole, B. Linnhoff, Total site targets for fuel, co-generation, emissions, and cooling, *Computers Chemical Engineering*, 17 (1992) 101–109
105. K. Raissi, Total site integration, Ph.D. Thesis, UMIST, UK, 1994
106. C. Hu, S. Ahmad, Total site heat integration using the utility system, *Computers and Chemical Engineering* 18 (1994) 729–742
107. J. Klemes, V. R. Dhole, K. Raissi, S. J. Perry, L. Puigjaner, Targeting and design methodology for reduction of fuel, power and CO₂ on total sites, *Applied Thermal Engineering* 7 (1997) 993–1003

108. Y. Makwana, R. Smith, XX. Zhu, A novel approach for retrofit and operation management of existing total sites, *Computer Chemical Engineering*, 22 (1998) 793–806.
109. H. Kimura, R-curve concepts for analysis and optimisation of cogeneration systems, MSc Dissertation, UMIST, UK, 1998
110. F. Maréchal, B. Kalitventzeff, Energy integration of industrial sites: tools, methodology and application, *Applied Thermal Engineering*, 18 (1998) 921-33
111. H. Kimura, XX. Zhu, R-curve concept and its application for industrial energy management, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 39 (2000) 2315–2335
112. M. Bagajewicz, H. Rodera, On the use of heat belts for energy integration across many plants in the total site, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 79 (2001) 633-642
113. F. Marechal, B. Kalitventzeff, Targeting the integration of multi-period utility systems for site scale process integration, *Applied Thermal Engineering*, 23 (2003) 1763-1784
114. S. Perry, J. Klemes, I. Bulatov, Integrating waste and renewable energy to reduce the carbon footprint of locally integrated energy sectors, *Energy*, 33 (2008) 1489–1497.
115. S. Bandyopadhyay, J. Varghese, V. Bansal, Targeting for cogeneration potential through total site integration, *Applied Thermal Engineering*, 30 (2010) 6-14
116. P. Varbanov, J. Klemes, Total sites integrating renewables with extended heat transfer and recovery, *Heat Transfer Engineering*, 31 (2010) 733-741
117. Z. Fodor, P.S. Varbanov, J. Klemes, Total site targeting accounting for individual process heat transfer characteristics, *Chemical Engineering Transactions*, 21 (2010) 49-54
118. M.M. El-Halwagi, *Process Integration*, Elsevier: Academic Press, 2006
119. Vladimir Stijepovic, Patrick Linke, Sabla Alnouri, Mirjana Kijevcanin, Aleksandar Grujic, Mirko Stijepovic, Toward enhanced hydrogen production in catalytic naphta reforming process, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 2012, 11772-11784

120. M. Stijepovic, P. Linke, Optimal waste heat recovery and reuse in industrial zones, *Energy*, 36 (2011) 4019-4031
121. B. Linnhoff, V. R. Dhole, Shaftwork targets for low-temperature process design, *Chemical Engineering Science*, 47 (1992), 2081–2091
122. R. Smith, *Chemical Process Design and Integration*, John Wiley & Sons Ltd, 2005
123. P. S. Varbanov, S. Doyle, R. Smith, Modelling and Optimisation of Utility Systems, *Trans I ChemE*, 82 (2004), 561-574. S. P. Mavromatis, Conceptual Design and Operation of Industrial Steam Turbine Networks, *PhD Thesis, UMIST, UK*, 1996
125. S. P. Mavromatis, A. C. Kokossis, Conceptual Optimisation of Utility Networks for Operational Variations - I Targets and Level Optimisation, *Chem Eng Sci*, 53 (1998) 1585
126. C. C. Chou, Y. S. Shih, A Thermodynamic Approach to the Design and Synthesis of Utility Plant, *Ind Eng Chem Res*, 26 (1987) 1100
127. J. F. Peterson, W. L. Mann, Steam System Design: How it Evolves, *Chem Eng*, 92 (1985) 62
128. V. Stijepovic, P. Linke, M. Stijepovic, M. Lj. Kijevčanin, S. Šerbanovic, Targeting and design of industrial zone waste heat reuse for combined heat and power generation, *Energy*, 47 (2012), 302-313
129. T. K. Stovall, *Evaluation of Steam Pipeline*, United States Department of Energy, 1981
130. G. Towler, R. Sinnott, *Chemical Engineering Design: principles, practice and economics of plant and process design*, Butterworth-Heinemann , 2007
131. American Society of Mechanical Engineers, ASME B36.19M - 2004 Stainless Steel Pipe

Lista slika

Slika 2.1 Temperaturno - entalpijski profili tople i hladne procesne struje

Slika 2.2 Temperaturno-entalpijski profil tople i hladne struje za minimalnu razliku temperature 20°C

Slika 2.3 Temperaturno – entalpijski profili skupa toplih i hladnih procesnih struja

Slika 2.4. Velika kompozitna kriva

Slika 2.5 Velika kompozitna kriva dozvoljava različitim alternativnim pomoćnim strujama da budu procenjene

Slika 2.6 Integracija parnih turbine sa procesom

Slika 2.7 Dva alternativna grafa

Slika 2.8 Da bi se odredila površina mreže uravnotežene kompozitne krive su podeljene na temperaturne intervale

Slika 2.9 pokazuje podatke za struje date tabelom 2.1

Slika 2.10 CP tabela za projektovanje iznad i ispod Pincha za problem dat Tabelom 2.1

Slika 2.11 Dimenzionisanje uređaja iznad Pincha koristeći tick-off pravilo

Slika 2.12 Dimenzionisanje uređaja ispod Pincha koristeći tick-off pravilo

Slika 2.13 Kompletano projektovanje za podatke iz Tabele 2.1

Slika 2.14 Toplotni protoci u intervalu k

Slika 2.15 Interval za prošireni transshipment model

Slika 2.16 Primer toplotnih protoka u slučaju kada topla struja ne doprema toplotu svim intervalima

Slika 2.17 Toplotni protok u proširenom transshipment modelu

Slika 2.18 Superstruktura za parove H1-C1, H1-C2

Slika 2.19 Promenljive za superstrukuru sa dva para

Slika 2.20 Superstruktura sa dve pod mreže

Slika 2.21 Šematski prikaz postrojenja

Slika 2.22 Kompozitne krive za izvor i ponor toplote u postrojenju

Slika 2.23 Kompozitne krive sa pomoćnim strujama

Slika 2.24 Ušteda toplote u postrojenju

Slika 2.25 Protoci toplote uključujući sistem pomoćnih struja postrojenja

Slika 2.26 Tipovi optimizacionih problema koji se najčešće javljaju u hemijskom inženjerstvu

Slika 3.1 Ilustracija proizvodnog postrojenja

Slika 3.2 Ilustracija industrijskog kompleksa

Slika 3.3 Plan industrijskog kompleksa

Slika 3.4. Šematski prikaz dela energane i podaci koje je potrebno prikupiti

Slika 3.5. Potrebni podaci za razmenjivač topla procesna struja i hladna pomoćna struja

Slika 3.6. Eksergetska kompozitna kriva

Slika 3.7 Srednja temperatura segmenta

Slika 3.8. Eksergetske kompozitne krive u razmenjivaču toplote

Slika 3.9 Uspostavljanje veze između postrojenja

Slika 3.10 Razmena toplote između procesne i pomoćne struje: a) postojeći razmenjivač, b) novi razmenjivač

Slika 3.11 Šematski prikaz energane i sistema pomoćnih struja

Slika 4.1 Šematski prikaz konfiguracije energana u industrijskom kompleksu

Slika 4.2 Zavisnost ukupne efikasnosti od osovinskog rada

Slika 4.3 Zavisnost osovinskog rada od masenog protoka pare

Slika 4.4 Zavisnost ukupne efikasnosti od maksimalnog proizvedenog osovinskog rada sa promenom ulaznog pritiska

Slika 4.5 Zavisnost maksimalno proizvedenog osovinskog rada i maksimalnog izentropskog rada za različite ulazne pritiske

Slika 4.6 Izvodljive veze između postrojenja

Slika 4.7 Konfiguracija industrijske zone sa povraćenim pomoćnim strujama za dobijanje maksimalne snage

Slika 4.8 Konfiguracija industrijske zone sa povraćenim pomoćnim strujama za dobijanje minimalne potrošnje goriva

Slika 4.9 Konfiguracija industrijske zone sa povraćenim pomoćnim strujama za dobijanje maksimalne snage i minimalnih ukupnih troškova

Slika 4.10 Konfiguracija industrijske zone sa povraćenim pomoćnim strujama za dobijanje minimalne potrošnje goriva i minimalnih ukupnih troškova

Lista tabela

Tabela 1.1 Upotreba kombinovane proizvodnje toplote i električne energije u hemijskoj i petrohemijskoj industriji

Tabela 1.2 Prikaz korišćenja kombinovane proizvodnje toplote i električne energije u industriji celuloze i papira, u različitim zemljama

Tabela 2.1 Podaci o razmenjenoj toploti struja

Tabela 4.1 Zahtevi za toplim pomoćnim strujama u industrijskom kompleksu

Table 4.2. Podaci za procesne i hladne pomoćne struje u razmenjivačima toplote

Tabela 4.3 Proizvodnja električne energije i maseni protok pare kroz turbine

Tabela 4.4. Podaci potrebni za određivanje koeficijenata za turbine

Tabela 4.5. Korelacioni parametri za parne turbine

Tabela 4.6 Maseni protoci HTPS koje mogu biti generisane u industrijskom kompleksu

Tabela 4.7 Promena eksergije procesne struje i HTPS tokom razmene toplote

Table 4.8 Podaci za integracioni potencijal HTPS

Table 4.9 Promena temperature duž cevovoda po jedinici dužine

Tabela 4.10 Transportne temperature i izvodljiva povezivanja

Tabela 4.11 Optimizovane vrednosti proizvodnje električne energije i masenog protoka za maksimalnu proizvodnju električne energije

Table 4.12 Rezultati optimizacije za dostizanjemaksimalne proizvodnje električne energije

Tabela 4.13 Optimizovana proizvodnja snage i masenog protoka na turbinama pri minimalnoj potrošnji goriva

Tabela 4.14 Rezultati optimizacije pri minimalnoj potrošnji goriva

Tabela 4.15 Koeficijenti prolaza toplote

Tabela 4.16 Optimizovana proizvodnja snage i masenog protoka na turbinama pri maksimalnoj proizvodnji snage i minimalnim ukupnim troškovima

Tabela 4.17 Rezultati optimizacije za maksimizovanje snage i minimalnim ukupnim troškovima

Table 4.18 Optimizovana proizvodnja snage i masenog protoka na turbinama pri minimalnoj potrošnji goriva i minimalnim ukupnim troškovima

Tabela4.19 Rezultati optimizacijepri minimalnoj potrošnji goriva i minimalnim ukupnim troškovima

Lista oznaka

a i b - korelacioni koeficijenti

a , b , c – konstante koštanja koje variraju u zavisnosti od konstrukcionog materijala, pritiska i tipa razmenjivača

a_0 , a_1 , a_2 , a_3 – korelacioni koeficijenti

A_1 – cena cevi po jedinici težine (0.82 \$/kg)

A_{11} , A_{12} - površina razmenjivača toplote 11 i 12

A_2 – cena instalacije cevi ($185\$/m^{0.48}$)

A_3 - fiksni kapitalni troškovi (6.8 \$/m)

A_4 – cena izolacije (295 \$/m)

$A_{i,j,k,l}$ – površina razmenjivača toplote za toplotnu razmenu (m^2)

$A_{MREŽE}$ – površina za toplotnu razmenu za vertikalni prenos toplote za celu mrežu

$A_{MREŽE,kei}$ – površina za toplotnu razmenu za vertikalni prenos toplote u entalpijskom intervalu k_{ei}

C – broj komponenti

$C1$, $C2$ - hladne struje

c_1 , c_2 , β - parametri troškova

C_{el} – cena električne energije

C_{elcena} – cena električne energije na tržištu

C_g C_g - cena goriva

C_{goriva} – cena goriva

C_{it} - investicioni troškovi

C_{it1} i C_{it2} - investicioni troškovi za dva razmenjivača toplote

C_k - $\{j\}$ hladna struja j zahteva toplotu iz temperaturnog intervala k_{ti}

$Cost_{Hex}$ - cena koštanja razmenjivača toplote (\$)

CP - vodeni ekvivalent

$C_{p,liq}$, $C_{p,vap}$ i $C_{p,gas}$ - srednji specifični toplotni kapaciteti

CP_C - vodeni ekvivalent hladne procesne struje

CP_G - toplotni kapacitet pomoćne struje u gasovitom stanju (kJ/kg/K)

CP_H - vodeni ekvivalent tople procesne struje

CP_L - toplotni kapacitet pomoćne struje u tečnom stanju (kJ/kg/K)

$D_{spoljašnji}$ - spoljašni prečnik cevi (m)

ΔEx - promena eksergije

ΔEx^{HPS} – eksergija hladne pomoćne struje u postojećem razmenjivaču toplote

ΔEx^{HTPS} – eksergija HTPS u novo uspostavljenom razmenjivaču toplote

ΔEx_{loss} - gubitak eksergije

ΔEx^{pf} – promena eksergije procesnog fluida

ΔEx^{rf} – promena eksergije rashladnog fluida

$E_{k,l}^{novo}$ - vrednost generisane električne energije nakon uspostavljanje integracije

$E_{k,l}^{trenutno}$ - vrednost generisane električne energije pre uspostavljanja integracije

$f(x)$ - funkcija cilja

F, f – protok

$FT_{i,j,k,l}$ - korekcionni faktor

$g(x,y)$ - nejednačine koje opisuju specifikacije koje sistema mora da zadovolji

GP - ukupni godišnji profit

$h(x,y)$ – jednačine kojima je opisan prediktivni model

H - entalpija

ΔH_{kei} – promena entalpije u entalpijskom intervalu k_{ei}

$H1$ - topla struja

h_i, h_j – koeficijenti prenosa filma za toplu struju i i hladnu struju j (uključujući zid i otpor onečišćenja)

$h_{izentropsko}$ - entalpija pare na izlaznom pritisku koja ima istu entropiju kao ulazna struja

h_{izlaz} - specifična entalpija izlazne pare

H'_k - $\{i\}$ tople struje i su prisutne u interval k_{ti} ili na višem intervalu}

H_k - $\{i\}$ topla struja i doprema toplotu u temperaturni interval k_{ti} }

HPS - hladna pomoćna struja

HS - para visokog pritiska

$HTPS$ - hladno topla pomoćna struja

h_{ulaz} - specifična entalpija ulazne pare

ΔH - promena entalpije

$\Delta h_{liq}, \Delta h_{zasićenja}, \Delta h_{gas}$ – promene entalpije u tečnoj fazi, pri faznoj transformaciji i u gasnoj fazi

$\Delta H_{vap} (q_{k,l}^{sat})$ - latentna toplota fazne transformacije pomoćne struje l , u postrojenju ponora toplote k (kJ/kg)

I – ukupan broj toplih struja u entalpijskom intervalu k_{ei}

I_p - integracioni potencijal

J – ukupan broj hladnih struja u entalpijskom intervalu k_{ei}

$J_p - \{j\}$, skup procesnih struja u postrojenju p koje odbacuje višak toplote u hladne pomoćne struje

K - koeficijent prolaza toplote

K_{11}, K_{12} - ukupni koeficijenti prolaza toplote za dva razmenjivača

K_{ei} – ukupan broj entalpijskih interval

$K_{i,j,k,l}$ – koeficijent prenosa toplote ($\text{kW/m}^2/\text{K}$)

K_q - broj temperaturnih interval u podmreži q

KP - kapitalni troškovi

k_{ti} - temperaturni interval

K_{ti} - ukupan broj temperaturnih interval

L – broj nezavisnih petlji

L - parametar koji zavisi od karakteristika turbine

$L_{i,j,k,l}$ - rastojanje (m) između novouspostavljenog razmenjivača u postrojenju izvoru i , procesne struje j i TPS l u postrojenju ponora k

$L_p - \{l\}$, skup pomoćnih struja u postrojenju p

LS – vodena para niskog pritiska

m - maseni protok pare kroz turbine

$m_{k,l}^{G,novo}$ - maseni protok goriva koji se troši nakon energetske integracije

m_{goriva} – maseni protok goriva

$m_{k,l}^{G,renutno}$ - maseni protok goriva koji se troši pre energetske integracije

m_{HTPS} - maseni protok hladno tople pomoćne struje

$m_{i,j,k,l}$ - maseni protok rashladno - grejnog fluida

m_{max} - maksimalni protok vodene pare kroz turbine

$m_{k,l}^{ps}$ - maseni protok pomoćne struje l , u postrojenju k

MS - para srednjeg pritiska

$m_{k,l}^{tmin}, m_{k,l}^{tmax}$ - minimalni i maksimalni protok kroz turbine pomoćne struja l u postrojenju k

$m_{k,l}^{turb}$ - maseni protok kroz turbinu pomoćne struje l , u postrojenju k

m_k^{vap} - proizvedena količina vodene pare veoma visokog pritiska (VHS)

$(m_{k,l}^{VHS})^{new}$ - maseni protok vodene pare vrlo visokog pritiska nakon integracije

$(m_{k,l}^{VHS})^{old}$ - maseni protok vodene pare vrlo visokog pritiska pre energetske integracije

N – broj jedinica ili omotača, u zavisnosti šta je pogodnije

n – nagib linearne Willanove linije

$N_{uredaja}$ – broj parova ili uređaja (linija u teoriji grafa)

OLP – procenjeni životni vek postrojenja

OP - operativni troškovi

OT – operativni troškovi

$P - \{p\}$, skup proizvodnih postrojenja u okviru industrijske zone

P_{cul} - odgovarajuća cena cevi (\$/m)

P_{el} – proizvedana električna energija

$P^I - \{i / i \in P, J_i \neq \emptyset\}$, skup postrojenja koja su izvor toplote

$P^K - \{k / k \in P, L_k \neq \emptyset\}$, skup postrojenja koja su ponor toplote

$(P_{\max}^{\text{novi}})_{i,j}$ - maksimalan pritisak HTPS koji se generiše u postrojenju izvora i u razmeni toplote sa procesnom strujom j

$Power_{k,l}^{\text{new}}$ - električna energija proizvedena u industrijskom kompleksu kada je uspostavljena integracija između postrojenja (kWh/god)

$Power_{k,l}^{\text{old}}$ - električna energija proizvedena u industrijskom kompleksu bez integracije postrojenja (kWh/god)

Pr_{power} - cena po kojoj se električna energija može prodati na tržištu

Pr_{VHS} - cena po kojoj se para vrlo visokog pritiska može nabaviti na tržištu

Q - razmenjena toplota

Q - toplotno opterećenje

Q_{11}, Q_{12} - toplotna opterećenja između tople struje 1 i hladne struje 1 i tople struje 1 i hladne struje 2

Q_{Cmin} - minimalni zahtevi za hlađenjem

Q_{ik}^H, Q_{jk}^C - sadržaj toplote tople pomoćne struje i i hladne struje j u temperaturnom intervalu k_{ti}

Q_{Hmin} - minimalni zahtevi za grejanjem

$q_{i,kei}$ - količina toplote koju može da oda topla struja i u entalpijskom intervalu k_{ei}

Q_{ijk} - razmena toplote između tople struje i i hladne struje j

Q_{ijk} - Razmenjena toplota tople struje i i hladne struje j u intervalu k_{ti}

Q_{ink} - Razmenjena toplota tople struje i i hladne pomoćne struje u intervalu k_{ti}

$q_{j, ket}$ – količina toplote koju može da prihvati hladna struja j u entalpijskom intervalu k_{ei}

Q_{ij}^L - donja granica razmenjene toplote između tople struje i i hladne struje j

Q_{mjk} - Razmenjena toplota tople pomoćne struje m i hladne struje j u intervalu k_{ti}

Q^S, Q^W - toplotno opterećenje toplih pomoćnih struja m i hladnih pomoćnih struja n

Q_{ij}^U - gornja granica razmenjene toplote između tople struje i i hladne struje j

R - vrednost proizvedena integracijom

R_{el} – vrednost električne energije proizvedena usled povećanja proizvodnje električne energije (\$/god)

R_{i2} - ostatak toplote koji napušta interval 2

R_{ik} - Ostatak toplote tople struje i koji napušta interval k_{ti}

R_{ik}, R_{mk} - pojedinačni ostaci toplote za svaku toplu struju i i svaku toplu pomoćnu struju m , koji su prisutni na intervalu k_{ti} ili na intervalu iznad

R_k - ostatak toplote koji napušta temperaturni interval k_{ti}

R_{mk} - Ostatak toplote tople pomoćne struje m koji napušta interval k_{ti}

RU_{ij} - broj postrojenja izvora toplote i , procesne struje j

RV - rashladna voda

R_{VHS} – vrednost pare vrlo visokog pritiska proizvedena usled smanjene proizvodnje pare vrlo visokog pritiska (\$/god)

S – broj struja uključujući pomoćne struje (tačke u teoriji grafa)

S - entropija

S'_k - $\{m\}$ tople pomoćne struje m su prisutne u interval k_{ti} ili na višem intervalu

S_k - $\{m\}$ topla pomoćna struja m doprema toplotu u temperaturni interval k_{ti}

SOL - radni vek sistema

ΔS - promena entropije

t - diskrtene promenjive

T_0 - standardna temperatura

t_1^{in}, t_1^{out} - ulazne i izlazne temperature hladne struje 1

t_2^{in}, t_2^{out} - ulazne i izlazne temperature hladne struje 2

T^{in}, T^{out} - ulazne i izlazne temperature tople struje 1

$(T_{\max}^{novo})_{i,j}$ - maksimalna temperatura rashladno – grejnog fluida, koja se generiše u postrojenju izvora i , u razmeni toplote sa procesnom strujom j

$T_{i,j,k,l}^{novo}$ - temperatura na kojoj je potrebno generisati rashladno - grejnu pomoćnu struju

TOC - ukupni kapitalni troškovi

T_{pf} – temperatura procesnog fluida

$T_{zasićenja,izlaz}$ - temperatura zasićenja vodene pare na izlazu iz turbine

$T_{zasićenja,ulaz}$ - temperatura zasićenja vodene pare na ulazu u turbine

$\Delta T_{i,j,k,l}$ - pad temperature prilikom prenosa od izvora toplote i do ponora toplote k

ΔT_{ln} - srednja logaritamska razlika temperatura

$\Delta T_{ln,i,j,k,l}$ - srednja logaritamska razlika temperatura u razmenjivaču u postrojenju izvora i (K)

$\Delta T_{ln,kei}$ – srednja logaritamska razlika temperatura za entalpijski interval k_{ei}

ΔT_{min} - minimalna razlika temperatura

U – ukupni koeficijent prenosa toplote

u – brzina fluida u cevi (m/s)

U_{ij} - najmanjim sadržajem toplote dve struje

$u_{k,l}$ - binarna promenljiva koja ukazuje na ograničenja masenog protoka

U_{kl} - broj postrojenja ponora toplote k , glavne pomoćne struje l

vektor n - kontinulane promenjive

VHS - para vrlo visokog pritiska

W - proizvedeni osovinski rad

$W_{gubitaka}$ - energetski gubitak u turbine

$W_{izentropsko,max}$ - izentropski rad za maksimalni protok pare kroz turbine

$W_k - \{n\}$ hladna pomoćna struja n izdvaja toplotu iz temperaturnog intervala k_{ti}

W_{max} - maksimalni osovinski rad turbine

W_{max} - maksimalni rad koji turbina može da proizvede

W_{min} - minimalan rad koji turbina može da proizvede

W_{ods} - odsečak Willanove linije

$w_{i,j,k,l}^P$ - binarna promenljiva koja ukazuje na izvodljivost uspostavljanja veze između izvora i , i procesne struje j , i ponora k , i tople pomoćne struje l

$w_{i,j,k,l}^T$ - binarna promenljiva koja ukazuje na izvodljivost uspostavljanja veze između izvora i i procesne struje j , i ponora k i tople pomoćne struje l

w_{tecv} - težina cevi po jedinici dužine (kg/m)

y_{ij}^q - binarna promenljiva za pod mrežu q

T_{ln} - srednja logaritamska razlika temperature

$h_{mehaničko}$ - mehanička efikasnost

h_{ST} - ukupna efikasnost

$\eta_{izentropsko}$ - izentropska efikasnost turbine

$\eta_{ST,max}$ - ukupna efikasnost parne turbine za maksimalni protok

θ_1, θ_2 - temperature na krajevima razmenjivača

$q_{k,l}^{gas}$ - je zahtevana temperatura povraćene pomoćne struje na ulazu u cevovod u cilju stvaranja izvodljive konekcije sa pomoćnom strujom l , postrojenja ponora k ($^{\circ}C$)

$q_{in,i}$ - ulazna temperatura tečne faze pomoćne struje koja se generiše u postrojenju i ($^{\circ}C$)

$\theta_{k,l}$ – minimalna prihvatljiva temperatura tople pomoćne struje l , u ponoru toplote k

$q_{k,l}^{sat}$ - temperatura zasićenja pomoćne struje l , postrojenja ponora k ($^{\circ}C$)

$\Theta_{i,j}$ - višak toplote koji izvor poseduje (kJ/kg)

λ - parametar koji pokazuje deo masenog protoka kojem je dozvoljeno da bude povećan ili smanjen oko optimalnog masenog protoka kroz turbinu

$\pi_{k,l}$ – minimalni prihvatljivi pritisak tople pomoćne struje l u ponoru toplote k

$\rho_{i,j,k,l}$ – gustina HTPS koju je generisala procesna struja j u postrojenju i i koja se povezuje sa TPS l u postrojenju k (kg/m^3)