Povećanje djelotvornosti spremnika topline kod proizvodnje piva

Šoštarić, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:807609

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Tomislav Šoštarić

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, rujan 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Tomislav Šoštarić

POVEĆANJE DJELOTVORNOSTI SPREMNIKA TOPLINE KOD PROIZVODNJE PIVA

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: dr.sc. Ljubica Matijašević, red. prof.

Članovi ispitnog povjerenstva:

dr. sc. Ljubica Matijašević, red. prof. FKIT

dr. sc. Igor Dejanović, doc. FKIT

dr. sc. Vanja Kosar, izv. prof. FKIT

Zagreb, rujan 2015.

ZAHVALA

Zahvaljujem svojoj mentorici, prof. dr. sc. Ljubici Matijašević na savjetima, pomoći i usmjeravanju pri izradi ovog diplomskog rada, a posebice na pristupačnosti, strpljenju i razumijevanju za brojne odgode te smirenosti zbog kojih je izrada ovog rada bila divno iskustvo.

Također se zahvaljujem doc. dr. sc. Igoru Dejanoviću na malobrojnim, ali važnim riječima podrške i ohrabrenja.

Najveću zahvalu upućujem svojoj obitelji, roditeljima Mariji i Zlatku što me podnose ove silne godine i sestrama Ines i Mirjani jer sam već spomenuo roditelje pa moram i njih.

Rad posvećujem baki Ljubici – Slavici Šoštarić.

SAŽETAK

Povećanje djelotvornosti spremnika topline kod proizvodnje piva

Spremnici topline imaju ključnu ulogu kod djelotvornog korištenja topline u proizvodnim procesima. To su uređaji koji privremeno pohranjuju toplinu pri visokim i niskim temperaturama i na taj način smanjuju potrebu za vanjskim izvorima grijanja ili hlađenja koji su nužni u proizvodnim procesima. Najčešće korišteni su spremnici tople vode. Kod procesa proizvodnje piva u upotrebi su spremnici za toplu i hladnu vodu, vrlo često sa više zona grijanja ili hlađenja kako bi se zadovoljio temperaturni režim proizvodnje piva. Kod pivovara koji rade sa smanjenim kapacitetom dolazi do gubitka topline prilikom prekida rada od više dana što utječe na veću potrošnju vanjskih energenata. Cilj rada je analiza spremnika topline u lokalnoj pivovari, srednjeg kapaciteta i mogućnosti povećanja njegove djelotvornosti.

Ključne riječi: proizvodnja piva, spremnici topline, integracija topline

ABSTRACT

Increasing efficiency of a heat storage in beer production

Thermal energy storage systems are key to efficient heat utilization in industrial processes. This technology is used for temporary storage of heat at high and low temperatures thus reducing the need for external sources of heating or cooling that are necessary in manufacturing processes. The most commonly used heat storage systems are hot water tanks. In beer production, both hot and cold water tanks are utilized, often with multiple heating and cooling zones in order to provide adequate temperature conditions. Brewhouses which operate at a reduced capacity have longer shutdown periods and therefore suffer heat losses that result in greater external energy consumption. The aim of this paper is to analyze a heat storage of a medium capacity, local brewery and the possibilities of increasing its efficiency.

Key words: beer production, thermal energy storage, heat integration

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. OPĆI DIO 2
2.1 Energenti u industriji 2
2.2 Smanjenje potrošnje energije 4
2.2.1 Integracija topline i *pinch* analiza 5
2.2.2 Integracija topline u šaržnim procesima 5
2.2.3 Spremnici topline 7
2.3 Proces proizvodnje piva 10
2.3.1 Opis procesa 10
2.3.2 Potrošnja energije u pivovari 12
Toplinska energija u pivovari 13
Integracija topline u proizvodnji piva 14
3. METODOLOGIJA 19
3.1 Motivacijski primjer 19
3.1.1 Kratak opis procesa 19
3.1.2 Energenti u procesu 20
3.2 Toplinska analiza 21
3.2.1 Analiza cijelog procesa 21
3.2.2 Analiza spremnika topline 22
3.2.3 Primjena solarnih sustava 27
4. REZULTATI I RASPRAVA 28
4.1 Tokovi topline u procesu 28
4.2 Rezultati *pinch* analize 29
4.3 Rezultati analize spremnika 31
4.4 Rezultati analize primjene solarnih sustava 35
5. ZAKLJUČCI 37
6. LITERATURA 38
POPIS SIMBOLA 40
POPIS OZNAKA 42
PRILOZI 43

1. UVOD

Brzi razvoj industrije i porast broja stanovnika u svijetu od sredine prošlog stoljeća utjecali su na potrošnju energenata u svim područjima ljudskih djelatnosti. Prekomjerna potrošnja energenata dugoročno nije održiva radi ograničenih zaliha fosilnih goriva kao primarnih izvora energije i čestih promjena cijena goriva. Zaštita okoliša i dobro gospodarenje energijom postali su glavni predmet interesa u razvijenim zemljama svijeta, posebno u industrijskoj djelatnosti. Smanjenjem potrošnje energije smanjuju se troškovi proizvodnje kao i emisije u okoliš, pogotovo u odnosu na primarne izvore energije.

Dobrim gospodarenjem energijom može se postići održivi razvoj u industrijskoj proizvodnji, ali i svakodnevnom životu. Na okoliš se može utjecati zamjenom primarnih izvora energije s obnovljivim izvorima energije (sunčeva energija, energija vjetra i drugi izvori). Kod energetski intenzivnih procesa integriranim pristupom moguće je maksimalno iskoristiti toplinu koja nastaje tijekom proizvodnog procesa što dovodi do smanjenja potrošnje energenata. Značajnu ulogu u pohranjivanju topline u procesima imaju spremnici topline koji sa različitim zonama grijanja ili hlađenja osiguravaju toplinu (temperaturu) prema zahtjevima procesa.

Kod šaržnih procesa kao što su pivovare, operacije se ne odvijaju kontinuirano dolazi do prekida proizvodnje kod završetka jednog ciklusa, što znači da u takvim procesima ne postoje struje koje se stalno griju ili hlade već njihova prisutnost ovisi o rasporedu odvijanja jediničnih operacija u procesu. Rješenje problema je u uvođenju spremnika topline u sustave pripreme tople vode. U spremnike topline se pohranjuju para ili voda povišene temperature koji se koriste tokom naknadnih procesa čime se postižu uštede goriva.

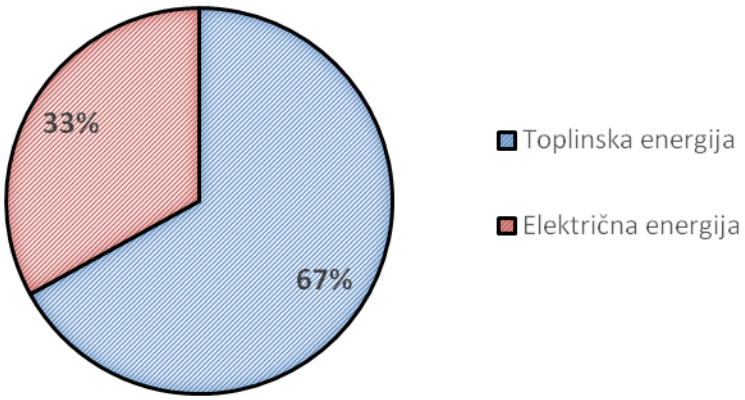
Kod pivovara koji rade sa smanjenim kapacitetom, dolazi do gubitka topline u spremnicima prilikom prekida rada od više dana tako da je potrebno dogrijavanje što utječe na povećanu potrošnju vanjskih energenata.

2. OPĆI DIO

2.1 Energenti u industriji

Unutar IPPC direktiva Europska komisija je 2002. objavila referentne dokumente – BREF-ove (*Best available techniques Reference document*), koje sadrže smjernice s ciljem sprječavanja i kontrole onečišćenja koje posredno utječu na smanjenu potrošnju energije i održivu proizvodnju. Zahtjevi IPPC direktiva temelje se na primjeni najbolje raspoloživih tehnika (BAT – *Best Available Technique*) koji se utvrđuju Zakonom o zaštiti okoliša. 2006. objavljena je verzija dokumenta namijenjena industriji hrane, pića i mlijeka – FDM (*Food-Drink-Milk)* industriji. U toj grani industrije potrošnja energije predstavlja najveći trošak tijekom proizvodnje i potrebno ju je smanjiti. Smanjenjem potrošnje energije smanjuju se operativni troškovi kao i utjecaj na okoliš, posebno kroz smanjenje emisije CO_2.[1]

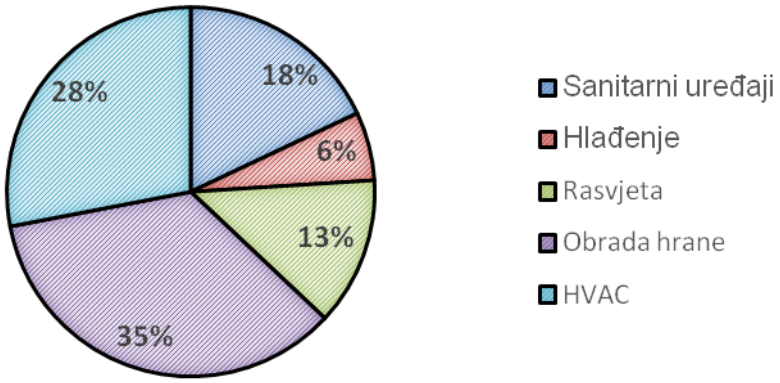
Prema podacima Europske Komisije iz 2011., od ukupno potrošene energije u svim granama djelatnosti, 28 % energije se troši u industriji, od čega 67 % otpada na toplinsku energiju, a 33% na električnu energiju. Na slici 1. prikazana je raspodjela potrošnje energije u industrijskom sektoru.[2]



Slika 1. Raspodjela potrošnje energije u industriji[2]

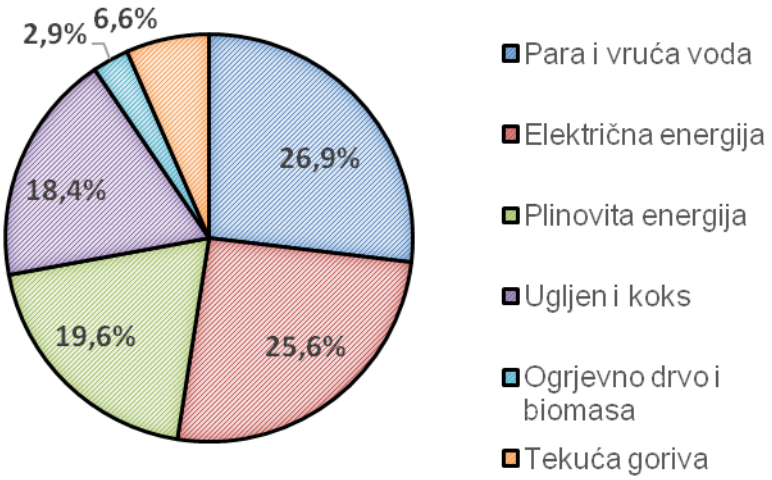
Američka agencija za zaštitu okoliša EPA (*Environmental Protection Agency*) dala je raspodjelu potrošnje energije u industriji hrane i pića koja je prikazana na slici 2. Iz slike je

vidljivo da se najviše energije troši na obradu hrane, a nakon toga na sustav grijanja, ventilacije i klimatizacije prostorija – HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*).



Slika 2. Raspodjela potrošnje energije u FDM industriji[3]

U Republici Hrvatskoj razvojem energetskog sustava bavi se energetski institut Hrvoje Požar. Prema njihovim podacima od ukupne potrošnje energije u industriji u Hrvatskoj, prehrambena industrija troši 21,9 %. Podaci iz 2012. govore da su u Hrvatskoj u proizvodnim procesima od energenata najzastupljeniji primarni izvori energije što vrijedi i za prehrambenu industriju i industriju pića. Na slici 3. prikazana je zastupljenost pojedinih energenata u industrijskoj proizvodnji Republike Hrvatske.



Slika 3. Zastupljenost energenata u industriji Hrvatske[4]

2.2 Smanjenje potrošnje energije

Održivi razvoj se ne može postići samo zamjenom primarnih izvora energije, već energenti moraju biti dugoročno dostupni u svakom trenutku po prihvatljivoj cijeni i bez štetnih utjecaja na društvo i okoliš, a za samu uštedu energije na procesima razvijen je cijeli niz alata, vještina i tehnologija koje se baziraju na integriranom pristupu povezivanja svih energetski aktivnih jedinica unutar procesa.

Donedavno se integracija topline primjenjivala isključivo u kontinuiranim procesima. Razlog je u činjenici da tehnike integracije topline podrazumijevaju stacionarno stanje – osobinu kontinuiranih procesa i što šaržni procesi nisu energetski intenzivni kao kontinuirani. No u duhu održivog razvoja i smanjenja potrošnje energije te porastom uporabe šaržnih procesa, dolazi do primjene poznatih tehnika integracije topline ili razvoja novih metoda za potrebe šaržnih procesa.[5, 6] Općenito, šaržni proces je onaj proces u kojem se niz operacija odvija u određenom vremenskom periodu na pojedinim jediničnim operacijama.

Integracija topline u šaržnim procesima, za razliku od kontinuiranih procesa je otežana radi toga što kod šaržnih procesa nisu stalno prisutne struje koje je potrebno grijati ili hladiti, već njihova prisutnost ovisi o rasporedu odvijanja jediničnih operacija u procesu. Ako se integracija topline provodi prema unaprijed određenom rasporedu operacija tada postoji mogućnost da će uštede integracijom topline biti neznatne. U obrnutoj situaciji, kada se raspored operacija prilagođava optimalnom iskorištenju topline može doći do neizvedivog rasporeda operacija ili znatnog produljenja vremena trajanja jednog ciklusa proizvodnje.[7] Rješenje problema je u uvođenju spremnika topline u sustave pripreme tople vode. U spremnike topline se pohranjuju para ili voda povišene temperature, koje bi inače završile kao otpadna toplina, te se koriste tokom naknadnih procesa čime se postižu uštede energenata.

Smanjenjem potrošnje energije neće se samo smanjiti operativni troškovi, već će doći i do smanjene emisije CO_2, a time i manjeg utjecaja na okoliš. Prvi korak prema smanjenju potrošnje energije je učinkovitije gospodarenje energijom. Gospodarenje energijom možemo definirati kao pristup kontroliranom smanjenju potrošnje energije i vezanih troškova. Drugi korak je optimizacija proizvodnih procesa raznim tehnikama.[7 – 9]

2.2.1 Integracija topline i *pinch* analiza

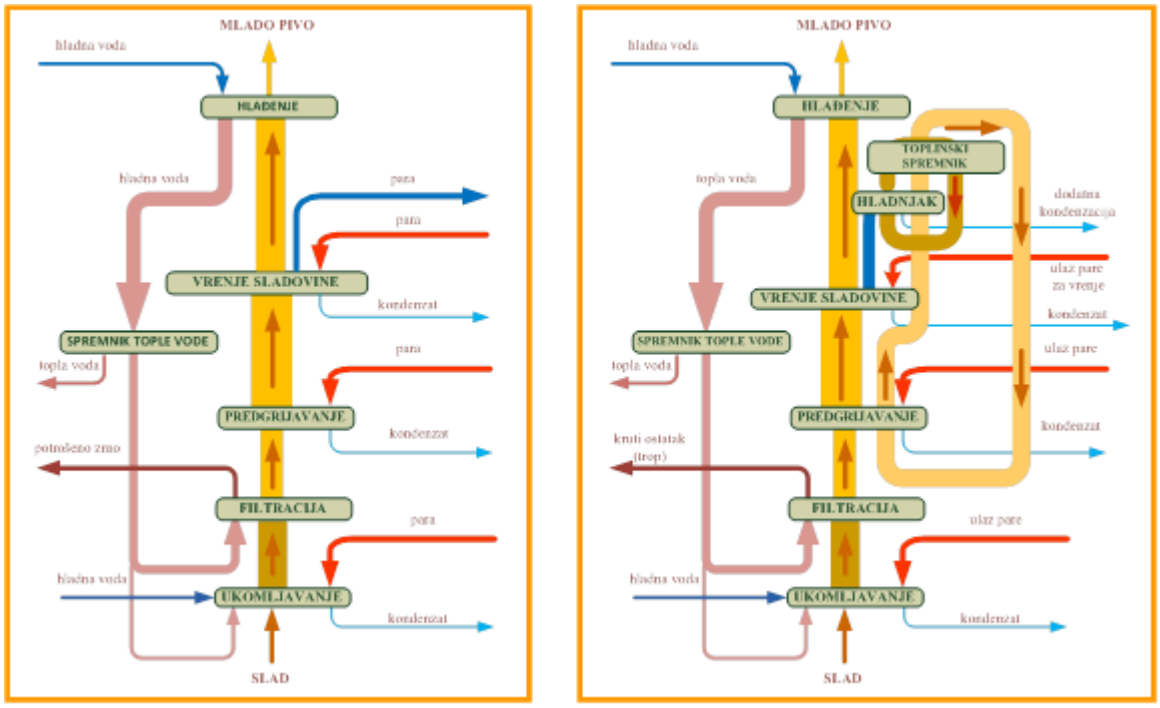
Pinch analiza je tehnika povezivanja (integracije) procesnih struja s ciljem minimalne potrošnje energije i maksimalne rekuperacije topline. Danas je metodologija *pincha* dobar i vrijedan pažnje alat za analizu i sintezu energetski iskoristivih dijelova procesa, kako pri izgradnji novih tako i na postojećim postrojenjima. *Pinch* metoda inženjeru projektantu daje jasan uvid kolika je nužna potrošnja energije i koji su uvjeti da se ona ostvari. Koristi se u dizajnu novih i optimizaciji postojećih postrojenja, a temelji se na izračunavanju termodinamički ostvarivih energetskih ciljeva u procesu i određivanjem načina postizanja tih ciljeva. Ovom se metodom struje dijele na tople – struje koje je potrebno hladiti, i hladne – struje koje je potrebno grijati. Nakon utvrđivanja takvih struja i definiranja njihovih vrijednost konstruira se toplinski dijagram (T – ΔH dijagram) s krivuljama koje daju uvid u količinu izmijenjene topline u nekom procesu u ovisnosti o promjeni temperature kao i količinu topline koju procesu treba dovesti i/ili odvesti toplim odnosno hladnim medijem. Struje se pri tome promatraju na razini čitavog sustava proizvodnje, a ne samo pojedinih procesa pa se zato i govori o *integraciji* topline. Rezultat *pinch* analize je sustav mreža izmjenjivača topline – HEN (eng. *Heat Exchanger Networks*) kojim se ostvaruje optimalno korištenje topline, a metoda se pokazala toliko uspješnom da su analogne metode razvijene za sustave integracije mase, minimalne potrošnje vode, distribucije tokova vodika i sl.

2.2.2 Integracija topline u šaržnim procesima

Metode integracije topline razvijene su za kontinuirane procese pri stacionarnom stanju, gdje za vrijeme trajanja procesa postoji stalna potreba za grijanjem ili hlađenjem. Na šaržnim procesima dugo nije bila primjenjivana integracija topline kao kod kontinuiranih procesa jer su to procesi koji rade s prekidima i nemaju kontinuiranu energetsku aktivnost. S trendom proizvodnje specijalnih kemikalija i proizvoda dodane vrijednosti te rastom cijene energenata, javljaju se interes i potreba za integracijom topline i u šaržnim procesima. Integraciju topline iznimno otežava što hladne i tople struje najčešće nisu prisutne u isto vrijeme što onemogućuje izmjenu topline. Također, sve struje nemaju stalne vrijednosti temperature i protoka, već se odvođenje ili dovođenje topline izvodi pomoću plašteva posuda i zmijača smještenih u posude. Kada se radi o proizvodima u malim količinama, energetska je potrošnja gotovo u potpuno u drugome planu. No unatoč navedenim

razlozima, integracija topline je uz određene prilagodbe moguća i potrebna u šaržnim procesima. Nakon dugotrajnog zanemarivanja radi prethodno navedenih specifičnosti šaržnih procesa, danas je moguće postići jednostavnu uštedu znatnih količina energije premda se teorijsko optimalno rješenje možda neće poklapati s ekonomski optimalnim redoslijedom operacija. S obzirom da se pritom analizira sustav kao cjelinu, često se spoznaju važni faktori nevezani uz energetsku potrošnju poput uskog grla procesa što dovodi do smanjivanja vremena trajanja ciklusa proizvodnje.

Primjena *pinch* analize u šaržnim procesima dovela je do učinkovitije integracije topline nestacionarnih dijelova u kontinuiranim procesima poput početka ili završetka proizvodnje. Dva često korištena modela za integraciju topline u šaržnim procesima su TAM (eng. *Time Average Model*) i TSM (eng. *Time Slice Model*). U prvom slučaju se koriste prosječne vrijednosti toplinskih tokova tokom vremena trajanja šarže, a u drugom se slučaju proces dijeli na vremenske intervale čije granice označavaju početak ili kraj prisutnosti tokova. Oba modela omogućuju prikaz energetskih ciljeva na jednak način kao i kod kontinuiranih procesa. Nemogućnost izravnog povezivanja toplih i hladnih struja prevladana je pohranom rekuperirane topline u spremnike te njeno neizravno korištenje tijekom kasnijih procesa.[10, 11] Vizualizacija tokova topline na procesu dana je na slici 4.

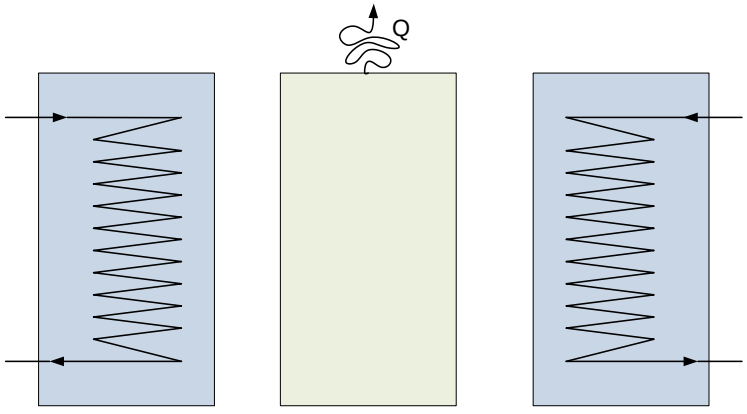


Slika 4. Vizualizacija tokova topline prije i nakon integracije topline

2.2.3 Spremnici topline

Spremnici topline važan su alat u pohrani energije jer omogućuju fleksibilno grijanje i/ili hlađenje u procesima uz smanjenu i učinkovitu potrošnju energije. Osnovni princip rada spremnika topline je pohrana toplog ili hladnog medija određene temperature sa svrhom naknadnog iskorištenja medija. Rad spremnika topline odvija se u tri faze: punjenje, pohrana i pražnjenje. Shematski prikaz rada spremnika topline dan je slikom 5. U fazi punjenja medij se dovodi u spremnik te sve do pražnjenja traje proces pohrane energije. Pri tom se mediju od početka pohrane do trenutka iskorištenja vrijednost temperature ne smije znatno promijeniti, tj. u trenutku korištenja vrijednost temperature medija mora zadovoljiti potrebe procesa. Mehanizmi pohrane zasnivaju se na povišenju ili snižavanju temperature medija, promjeni faze medija ili kombinaciji tih dvaju mehanizama. Toplina pohranjena promjenom temperature medija naziva se osjetnom ili senzibilnom toplinom, a toplina pohranjena promjenom faze medija latentnom toplinom.

Povezanost toplinske i ostalih oblika energije temelji se na osnovnim zakonima termodinamike i njihova primjena omogućuje dobro gospodarenje energijom. Prvi zakon termodinamike govori o očuvanju energije, ističe kako energija ne nastaje ili nestaje, već samo mijenja svoj oblik i prenosi se s jednog tijela na drugo. Drugi zakon termodinamike ističe da pri prijenosu i promjeni oblika energije u realnim procesima dolazi do gubitaka, tj. da je stvaran rad manji od idealnoga.



Slika 5. Shematski prikaz tri procesa rada spremnika topline: punjenje, pohrana i pražnjenje. Gubitak topline u okolinu prikazan je tijekom procesa pohrane iako se može odvijati tijekom sva tri procesa.[12]

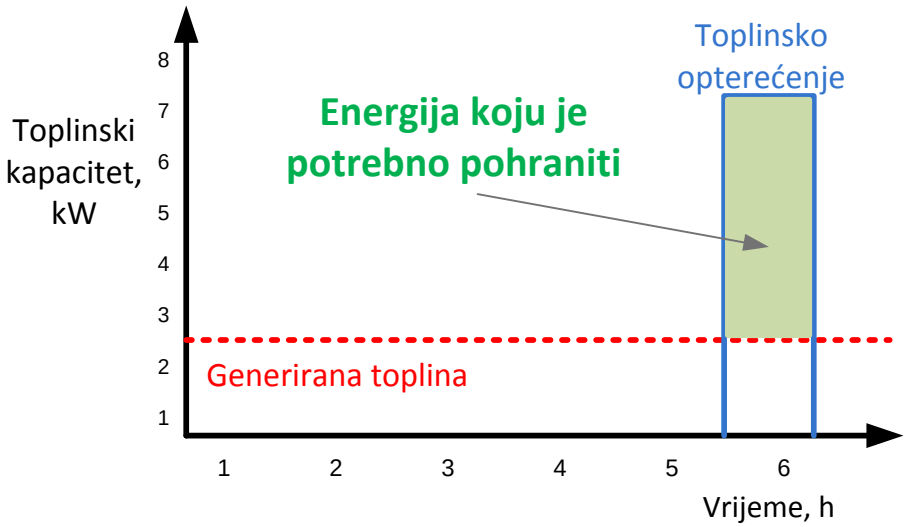
Uloga spremnika topline i njegova primjena u procesima nije uvijek jednaka, mogućnosti su sljedeće:

- Spremnik topline kao jedini izvor energije
- Spremnik topline kao parcijalni izvor energije
- Temperatura medija omogućuje izravno korištenje
- Temperatura medija zahtjeva dodatnu toplinsku obradu medija

Tehnologiju pohrane energije u spremnicima topline poznata je kao TES sustavi (engl. *Thermal Energy Storage*). Riječ je o skupini različitih tehnologija kojim se toplinska energija može pohranjivati u vremenskim periodima od nekoliko sati do više mjeseci. Ovisno o potrebama procesa, pri niskim temperaturama pohrane, kao medij se najčešće koriste led, snijeg i ukapljeni plinovi, a pri visokim vruća voda, para, zrak i rastaljene soli. Toplinsku energiju može se pohranjivati u konvencionalnim spremnicima (rezervoarima), ali i podzemnim pukotinama, vodonosnicima, jezerima itd. TES sustavi primjenjuju se uspješno diljem svijeta, posebice u razvijenim zemljama. U posljednje vrijeme naglasak je na primjenu TES sustava za grijanje i hlađenje prostorija, klimatizaciju, zagrijavanje vode i tzv. *Peak shaving*. Riječ je o radu s toplinskim sustavom čiji je maksimalni kapacitet generiranja energije niži od vršnog opterećenja. Pritom se viškovi energije pohranjuju u spremnik te iskorištavaju za vrijeme vršnog opterećenja. Ilustracija načela rada *Peak shavinga* dana je slikom 6. Najčešće prednosti TES sustava su:

- Smanjena potrošnja energije
- Smanjeni inicijalni (investicijski) te troškovi održavanja postrojenja
- Smanjene dimenzije opreme
- Povećana prilagodljivost u radu
- Smanjeno korištenje fosilnih goriva
- Smanjene emisije štetnih plinova
- Povećana učinkovitost procesne opreme

Time se povećava održivost sustava jer je omogućeno korištenje alternativnih izvora energije, smanjuju se troškovi rada i učinak na okoliš i društvo.

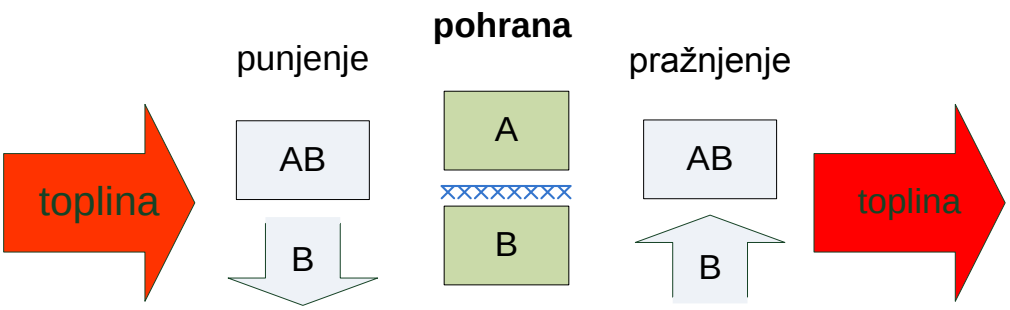


Slika 6. Načelo rada *Peak shavinga*.[13]

Općenito, kao spremnik topline najčešće se koristi konvencionalni spremnik tople vode. No u slučaju potrebe temperatura vrijednosti oko 100 °C ili više, voda nije idealan medij za pohranu topline. Sustavi pohrane s vodom imaju nisku gustoću pohrane, *Γ*, te čak i tlačni sustavi pri 120 °C imaju vrijednost *Γ* = 10 kWh/m^3 za temperaturnu razliku od 10 K. Niska vrijednost *Γ* zahtjeva spremnike velikih dimenzija, a kao rješenje tog problema predlaže se promjena medija za pohranu topline. Schreiber i suradnici predlažu pohranu topline na načelu adsorpcije. Adsorpcijski sustav sastoji se od različitih materijala A i B. Materijal B adsorbira se na površinu materijala A tvoreći sustav AB. Pritom dolazi do oslobađanja toplinske energije – adsorpcijske entalpije, *ΔH*. Dovođenjem topline započinje povratni proces kao što je prikazano jednadžbom (1).

$$A + B \overset{povratno}{\Longleftrightarrow} AB + \Delta H \qquad (1)$$

Dovođenje topline sustavu AB pri čemu dolazi do odvajanja materijala možemo nazvati *punjenjem* sustava. Odvajanjem materijala A i B postiže se pohrana topline. Odvođenje pohranjene topline postiže se ponovnom adsorpcijom materijala B, tj. pražnjenjem spremnika. Shematski prikaz načela pohrane topline adsorpcijom dan je slikom 7.



Slika 7. Shematski prikaz načela pohrane topline adsorpcijom.[13]

Za ulogu materijala A prikladni su zeoliti, vrlo porozni aluminosilikati s mogućnošću adsorpcije velike količine vodene pare kao materijala B. Takav način pohrane topline omogućuje veliku gustoću pohrane te sustav snabdijeva dovoljno visokim temperaturama za potrebe procesa u rasponu od 60 do 250 °C. Gustoća pohrane i temperature vode ovisit će o izvedbi i načinu integracije sustava pohrane u postojeći toplinski sustav te temperaturama adsorpcije i desorpcije.[13]

Na potrošnju energije može se utjecati i jednostavnijim postupcima, dobrim gospodarenjem, kao i redovitim pregledom postrojenja kada se mogu jasno uočiti, a potom i ukloniti curenja pare ili kondenzata. Izravna posljedica svakog takvog curenja je veća potrošnja energenata.
Osim toga, cjevovodi i oprema nisu uvijek odgovarajuće izolirani. Instalacijom potrebne izolacije na spomenutim elementima smanjit će se gubici topline u okolinu.
Tlak pare u cjevovodima ne smije biti niti previsok niti prenizak. Previsok tlak može uzrokovati curenje pare i/ili kondenzata, a prenizak tlak uzrokuje gubitke tijekom distribucije pare. Redovitim pregledom tlak pare može se držati na nižoj vrijednosti, ali da istovremeno budu zadovoljene maksimalne potrebe procesa.[14]

2.3 Proces proizvodnje piva

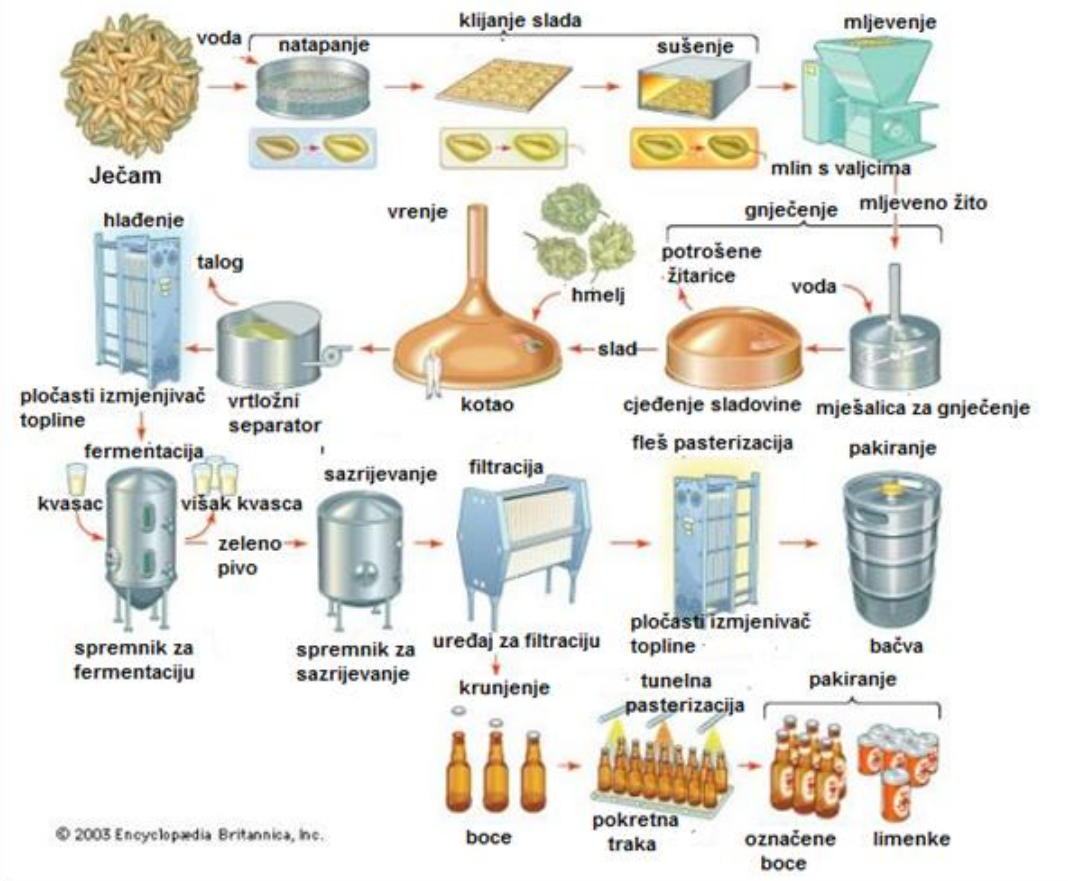
2.3.1 Opis procesa

Proces proizvodnje piva slikovito je prikazan na slici 8. Osnovne sirovine za proizvodnju piva su: ječam, hmelj, pivski kvasac i voda. Tijekom proizvodnje, pivo naizmjence prolazi kroz tri kemijske i biokemijske reakcije (nakon gnječenja vrenje, fermentacija i dozrijevanje) i tri separacije kruto-tekuće (separacija slada, bistrenje slada i bistrenje mladog

piva) pri čemu se troši ili oslobađa energija. Kod proizvodnje piva troše se velike količine vode, oko 2/3 u samom procesu i 1/3 za pranje i čišćenje. Dijelovi procesa u kojima se troši voda, energija, oslobađa toplina, gdje nastaje otpadna voda te kruti otpad ekonomski su isplativa mjesta za poboljšanje procesa proizvodnje piva. Upravljanje vodama, energijom i odlaganjem otpada znatno se utječe na cijenu kao i vođenje procesa u pivovari.[15]

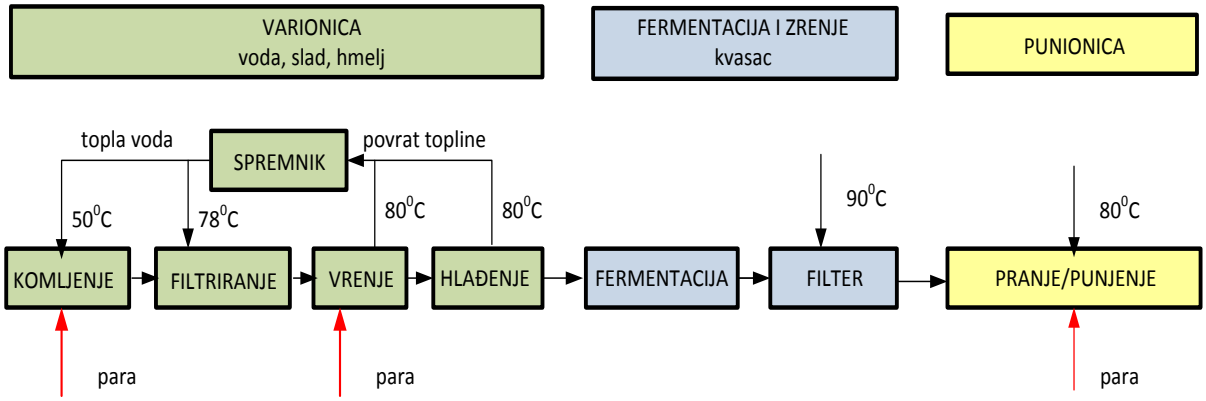
Cijeli proces proizvodnje provodi se u širokom rasponu temperatura za koji je potrebno dovoditi i odvoditi toplinu, što ukazuje na mogućnost integracije topline. Temperature koje se postižu tijekom procesa ovise o samom postupku proizvodnje piva. Ako procese u proizvodnji piva promatramo kroz potrošnju energije, moguće je cijelu proizvodnju podijeliti na tope i hladne procese te punjenje i pakiranje proizvoda. U tople procese ubrajamo ukomljavanje, filtraciju i vrenje, a u hladne fermentaciju i sazrijevanje piva.

U toplom dijelu, u procesima ukomljavanja, filtracije i vrenja (varionica) potrebne su velike količine topline dok su za hladni dio procesa (fermentacija/dozrijevanje) potrebne niske temperature.[16]



Slika 8. Proces proizvodnje piva

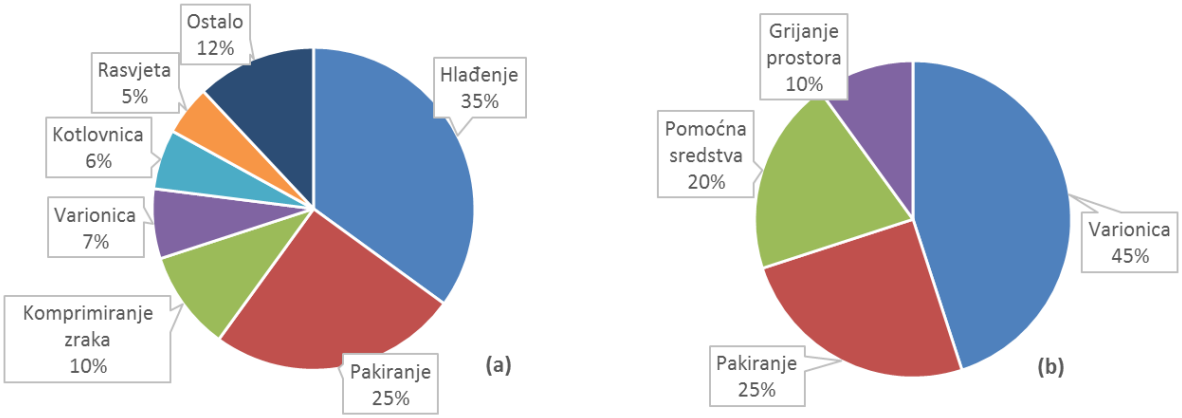
To omogućuje provedbu rekuperacije topline primjenom izmjenjivača topline i spremnika topline. Slika 9. pokazuje pojednostavljenu shemu proizvodnog procesa proizvodnje piva koji se može podijeliti u tri dijela: varionica, fermentacija i zrenje i punionica.



Slika 9. Glavni dijelovi proizvodnog procesa

2.3.2 Potrošnja energije u pivovari

Potrošnja energije u pivovarama ovisi o proizvodnom kapacitetu, geografskom položaju te proizvodu. Troši se električna i toplinska energija. Električna energija pogoni sve strojeve i opremu, a u proizvodnim procesima se koristi za hlađenje te pranje i pakiranje. Toplinska energija dobivena izgaranjem fosilnih goriva (zemni plin, ugljen, lož ulje) koristi se za generiranje pare i vruće vode koji se koriste u procesima proizvodnje, pakiranju kao i za grijanje radnog prostora. Na slici 10. prikazana je uobičajena raspodjela električne i toplinske energije u pivovari. Najviše električne energije troši se na hlađenje i pakiranje, dok se najviše toplinske energije troši na procesima u varionici i tijekom pakiranja. U tablici 1. prikazana je prosječna potrošnja električne i toplinske energije za pivovare različitih veličina. Na taj se način mogu pratiti razni parametri poput cijene, vremena potrebnog za određenu radnju u proizvodnom procesu ili kvalitete proizvoda te usporediti s ostalim proizvođačima.[17]



Slika 10. Udijeli potrošnje električne (a) i toplinske energije (b) u pivovarama[3]

Prema preporukama EC-a za povećanje energetske djelotvornosti, referentni dokumenti za izbor najboljih raspoloživih tehnika (BREF-ovi) za hranu, piće i mlijeko daju smjernice za smanjenje potrošnje energije i vode u procesima proizvodnje piva kako bi se postigle vrijednosti propisane direktivom IPPC. U tablici 1 dana je usporedba potrošnje energije u pivovarama sa standardnom opremom s pivovarama koje su primijenile smjernice EC-a kao i tehnologije za povećanje djelotvornosti rada.[1]

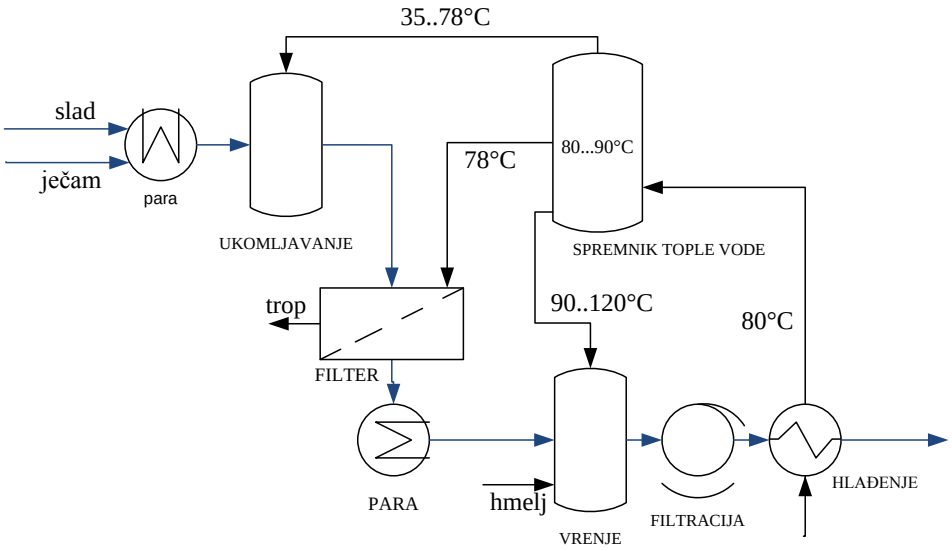
Tablica 1. – Potrošnja toplinske i električne energije u pivovarama[1]

	Standardna oprema	Primjena novih tehnologija
potrošnja toplinske energije	11 – 12 kWh/hl	7,5 kWh/hl
potrošnja električne energije	36 – 40 kWh/hl	24 kWh/hl

Toplinska energija u pivovari

Najviše toplinske energije troši se u varionici. Tijekom vrenja sladovina se uvodi u kotao gdje se grije parom na temperaturu od 100 °C. Za učinkovitu izvedbu procesa vrenja bitno je vrijeme zadržavanja sladovine u kotlu, količina isparene sladovine te utrošena energija. Količina isparene sladovine obično se kreće između 4 i 8 %. Buckee i Barrett su 1982. prikazali da se količina isparene sladovine može smanjiti na 2 % početnog volumena bez znatnog štetnog učinka na svojstva piva poput okusa, gorčine ili boje. Ovisno o kapacitetu količina utrošene energije tijekom vrenja iznosi između 24 i 54 MJ/hl. Ako je ukupna količina utrošene energije u proizvodnji piva 145 – 285 MJ/hl tada se za proces vrenja troši oko 18 % ukupne energije.[15, 18, 19]

S obzirom da se tijekom vrenja dodaje hmelj nije jednostavno izračunati količinu isparene sladovine. Prema količini isparene sladovine određuje se potrebna količina i protok kojim se para uvodi u kotao. S obzirom na to da će s vremenom doći do prljanja cjevovoda, preciznim se mjerenjem protoka pare osiguravaju jednake količine pare za svaku šaržu. To se postiže povećanjem protoka pare ili produljenjem vremena trajanja vrenja.[15] Na slici 11. prikazana je procesna shema toplog dijela procesa proizvodnje piva.



Slika 11. Procesna shema toplog dijela proizvodnje piva

Integracija topline u proizvodnji piva

U procesima proizvodnje piva kapljevine se zagrijavaju i hlade. Za potrebe procesa koji se odvijaju u varionici kapljevina se zagrijava, sladovina se predgrijava i zagrijava na temperaturu vrenja, a toplina se dovodi za zagrijavanje kotlova i opreme u kojoj se navedeni procesi odvijaju. U kotlovima se kapljevina zagrijava izmjenom topline primjenom zmijača i cijevnih izmjenjivača. Kod vanjske izmjene topline radi predgrijavanja ili hlađenja sladovine najčešće se koriste pločasti izmjenjivači topline gdje se kao topli medij koriste niskotlačna para ili vruća voda. Za hlađenje najčešće korištena rashladna sredstva su rashladna voda, smjesa etilen–glikol i amonijak.

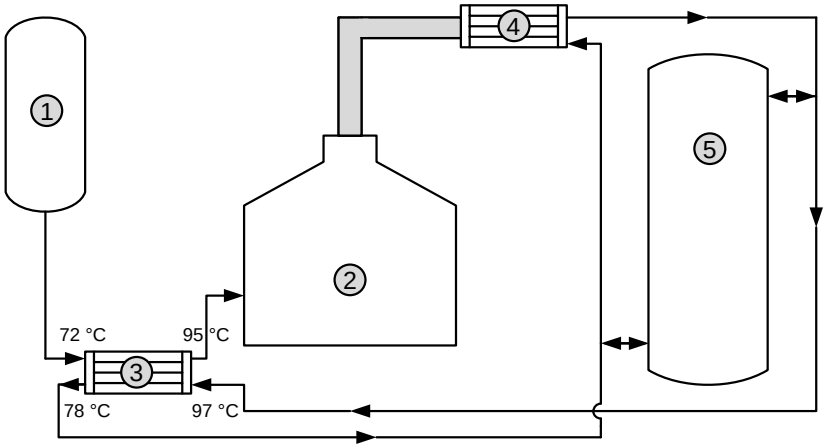
Uloga spremnika topline u procesima proizvodnje piva je skladištenje vode povišene temperature nastale tijekom proizvodnje radi korištenja u naknadnom procesu. Primarni izvor tople vode je rashladna voda korištena za hlađenje sladovine nakon procesa vrenja za potrebe procesa fermentacije. Jedan od načina smanjenja potrošnje toplinske energije u

varionici je rekuperacija (povrat) otpadne topline. Većina pivovara je primijenila rekuperaciju topline potrebne za ukomljavanje i zagrijavanje sladovine skladištenjem vode korištene kao rashladni medij za hlađenje sladovine nakon vrenja.

Mogućnosti za rekuperaciju (povrat) topline su slijedeće:

- *Povrat topline pomoću kondenzatora pare*

Kondenzacijom 1 kg pare u 1 kg vode pri 100 °C u okolinu se otpusti energija u iznosu od 2260 kJ/kg. Prema tome se isparenu vodu tijekom procesa vrenja može promatrati kao izvor znatne količine energije koje se može ponovno iskoristiti. Kondenziranu se paru može skladištiti u spremniku kao i vodu korištenu kao rashladni medij nakon procesa vrenja. Shematski prikaz izvedbe dan je slikom 12. Primjenom kondenzatora pare moguće je proizvesti vodu temperature i do 100 °C što omogućuje izvedbu sustava za pohranu topline s dva spremnika, jedan spremnik za vodu temperature oko 100 °C, a drugi za vodu temperature oko 80 °C. Takva izvedba pruža veću slobodu za selektivnu uporabu vode odgovarajuće temperature. Ako proizvodni kapaciteti ne opravdavaju upotrebu dva spremnika, voda se može ohladiti na temperaturu oko 85 °C, a isparavanjem samo 4 – 5 % početnog volumena sladovine rekuperirala bi se dovoljna količina topline potrebna za predgrijavanje sladovine. Kod procesa vrenja pri sniženom tlaku treba uvažiti činjenicu da ispari manja količina sladovine pa se i manje toplinske energije rekuperira.[20]



Slika 12. Shematski prikaz rekuperacije topline primjenom kondenzatora pare.[20]

- *Rekuperacija topline rekompresijom pare*

Postupci mehaničke i toplinske rekompresije pare provode se najčešće za procese vrenja pri atmosferskom tlaku jer u slučaju većih količina sladovine rekompresija pare zahtijeva primjenu termosifonskog isparivača. Za potrebe procesa vrenja pri sniženom tlaku izlazna temperatura pare morala bi iznositi 107 – 108 °C povećava potrošnju toplinske energije i toplinsko opterećenje sladovine. Temperatura pare nastale tijekom konvencionalnog procesa vrenja pri atmosferskom tlaku iznosi oko 100 °C. Povećanjem tlaka pare za 0.1 – 0.5 bar povisit će se temperatura na vrijednosti 102 – 108 °C. Kompresija se može provesti mehaničkim (mehanička) ili mlaznim (toplinska rekompresija) kompresorom. Kod mehaničke rekompresije para se komprimira na vrijednosti 1.3 – 1.4 bar. Ta se para koristi za održavanje željene temperature tijekom procesa vrenja, dok se prvotno zagrijavanje na željenu temperaturu postiže pomoću „svježe“ pare iz kotlova. Metodu rekuperacije topline mehaničkom rekompresijom nije moguće kombinirati s metodom rekuperacije kondenzatorom pare jer se sva para vraća u kotao za vrenje. Radi toga se rekuperirana para ne može koristiti za predgrijavanje sladovine, a kao dodatni nedostaci navode se složenije upravljanje postrojenjem, stvaranje buke tokom rada, visoki troškovi održavanja i rad pri vršnom opterećenju električne energije. Toplinska rekompresija se razlikuje od mehaničke po tome što zahtijeva tlakove u parnom kotlu od 8 – 18 bar nakon čega mlazna pumpa tlači paru za dodatnih 0,1 – 0,4 bar. Oko trećina pare se u kondenzatoru pretvori u vruću vodu koju se koristi za predgrijavanje sladovine. Prednosti toplinske rekompresije u odnosu na mehaničku su jednostavno i jeftino održavanje kompresora, tih rad, niži invensticijski troškovi (pogotovo za pivovare manjeg i srednjeg kapaciteta) te rad sa samo jednim mlaznim kompresorom. Nedostaci su potreba za novim cjevovodom zbog rada pri visokom tlaku, velika specifična površina izmjene topline te prisutnost veće količine vruće procesne vode, kondenzata otpadne vode te svježe vode za rad parnih kotlova.[20]

- *Solarni toplinski sustavi*

Velik potencijal za primjenu u industrijskim toplinskim sustavima ima sunčeva energija, posebice u tekstilnoj te industriji hrane i pića. Unatoč tome, solarni toplinski sustavi se trenutno pretežito koriste za grijanje i dobivanje tople vode u kućanstvima, a glavni razlozi su trenutno relativno niska cijena energenata, visoki troškovi instalacije solarne tehnologije te

nizak intenzitet sunčeve svjetlosti. Energija Sunca se pretvara u toplinsku energiju pomoću toplinskih solarnih kolektora. Sunčevo zračenje se asporbira na površini kolektora te zagrijava medij/fluid koji struji unutar kolektora. Najčešće korišteni tipovi kolektora u toplinskim sustavima su pločasti i cijevni vakuumski kolektori. Industrijski se sustavi, osim po većem kapacitetu i višim temperaturama, od kućanskih razlikuju i po potrebi integracije s već postojećim toplinskim sustavima. Najvažniji parametri za solarne toplinske sustave su dnevna količina potrebne topline u pripadajućim postrojenjima te lokalno specifično osunčanje i temperaturni profil tokom godine. Prilikom izvedbe se treba voditi računa hoće li se putem solarnog toplinskog sustava osigurati sva potrebna toplina pri željenoj temperaturi ili njen dio. Za slučajeve gdje se Sunčeva energija koristi kao dopunski izvor energije, najvažniji je parametar potrebna količina topline, odnosno količina energije koju solarni sustav pruža. S obzirom da se u tom slučaju Sunčeva energija prikuplja kad god je moguće, optimalna ušteda primarnog energenta ostvaraju se preciznom nadopunom glavnog toplinskog sustava dopunskim. Snabdijevanje topline pomoću solarnih kolektora izvodi se na dva načina: [21, 22]

- Mijenjanjem masenog protoka pojne stroje (vode) kolektora uz konstantnu vrijednost temperature izlazne struje
- Održavanjem konstantne vrijednosti masenog protoka pojne struje uz promjenljivu vrijednost temperature na izlazu.

- *Kogeneracijska proizvodnja topline*

U procesu proizvodnje piva, proces vrenja jedini zahtjeva temeperature približne vrijednosti 100 °C. Vršno toplinsko opterećenje tokom tog procesa znatno je veće u odnosu na ostale procese u proizvodnji piva što posebice dolazi do izražaja pri radu pivovara manjeg kapaciteta. Parni kotlovi koji bi mogli zadovoljiti vršno toplinsko opterećenje u slučaju manjih pivovara bili bi uvelike predimenzionirani za ostale procese u proizvodnji piva, što znači da bi bili energetski neučinkoviti. Zbog toga se u toplinske sustave uvodi spremnik topline, a za povećanje energetske učinkovitosti cijelog procesa proizvodnje često mu se pridružuje proizvodnja topline kogeneracijom. Energetski i ekonomski najučinkovitiji rad kogeneracijskog postrojenja ostvaruje se prilikom rada punim kapacitetom. Kogeneracijsko postrojenje s plinskim motorima može snabdijevati sustav toplinom iskorištavanjem topline rashladne kapljevine i ispušnih plinova. Pomoću rashladne kapljevine mogu se ostvariti

temperature do 90 °C, a ispušni plinovi mogu osigurati sustavu temperature i više od 100 °C. Viškovi topline dobiveni pomoću ispušnih plinova mogu se skladištiti u spremniku topline i iskoristiti za vrijeme vršnog opterećenja, odnosno vrenja. [20]

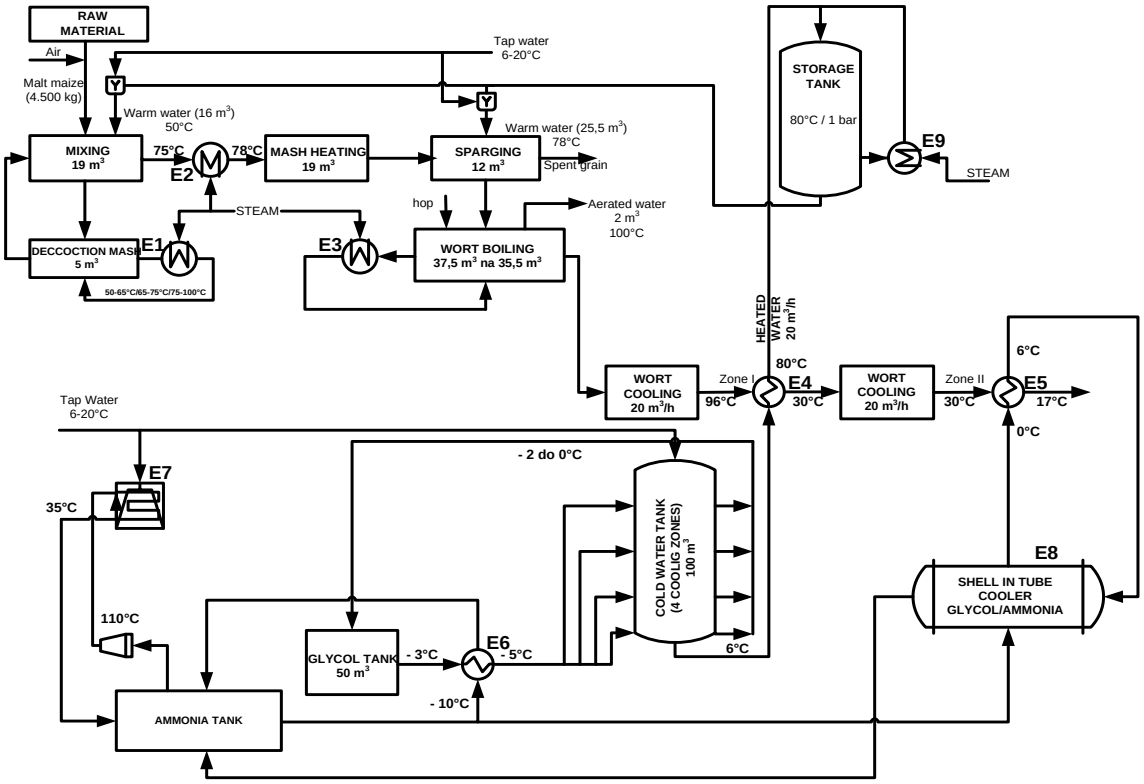
3. METODOLOGIJA

3.1 Motivacijski primjer

Toplinska analiza procesa proizvodnje piva provedena je za lokalnu pivovaru kapaciteta 300.000 hl pive na godišnjoj razini, a trenutni kapacitet je 70.000 hl. Pivovara ima 6 zaštićenih marki piva i vodi brigu o zadržavanju kvalitete istih. Trenutno radi sa smanjenim kapacitetom, a s obzirom da se radi o energetski intenzivnom procesu smanjuje se učinkovitost pojedinih dijelova procesa. Sama proizvodnja i kvaliteta nije upitna, jer se radi o šaržnom procesu i primjeni zaštićene recepture, ali prilikom prekida rada dolazi do gubitka topline posebno u spremnicima topline, tako da se ponovnim pokretanjem troši znatno više energije što utječe na poslovanje same pivovare.

3.1.1 Kratak opis procesa

Sladovina se proizvodi ukomljavanjem u varionici, gdje se mješavina vode i slada kuha pri različitim temperaturama (50/62/72 $^{\circ}$C) kako bi se postigla aktivacija enzima koji pretvaraju ječmeni slad u šećer. Nakon ukomljavanja, mješavina se zagrijava do 78 $^{\circ}$C i potom filtrira kako bi se odvojila sladovina. Sladovina se tijekom filtracije zagrijava do 100 °C te s dodavanjem hmelja vrije oko 90 minuta (kotao s unutarnjim grijanjem) čime se oblikuje okus piva (energetski najintenzivniji proces). Preostali hmelj i sedimente se od sladovine odvaja vrtloženjem. Potom slijedi dvostupanjsko hlađenje sladovine vodom i glikolom do željene temperature fermentacije. Hladna voda je pohranjenja u dva izolirana spremnika, volumena 100 m^3 pri 4 – 6 $^{\circ}$C te se nakon hlađenja, zagrijana odvodi u izolirani spremnik volumena 90 m^3 i ponovno koristi za komljenje. Hladni dio procesa sastoji se od fermentacije kvascem pri konstantnoj temperaturi, hlađenja i bistrenja te skladištenja piva u izolirane spremnike gdje se odvija sazrijevanje piva. Preostala proizvodnja piva odnosi se na pakiranje. Nakon što se boce napune pivom provodi se pasterizacija. Punionica i sustav pranja najveći su potrošači toplinske energije dočim su procesi fermentacije i sazrijevanja najveći potrošači električne energije. Jedan spremnik topline volumena 90 m^3 instaliran je u pivovari za potrebe procesa u varionici, a temperatura vode u spremniku iznosi oko 80 $^{\circ}$C.
Prema potrebi spremnik može toplom vodom snabdijevati i punionicu za procese pranja ambalaže. Procesna shema dana je na slici 13.



Slika 13. Procesna shema proizvodnje piva

3.1.2 Energenti u procesu

Za toplinsku analizu bitni su podaci o energentima u procesu koji su dani u tablicama 2. – 4.

Tablica – 2. Potrošnja goriva u trogodišnjem razdoblju

Korištena goriva							
Gorivo		**1. Prirodni plin**			**2. Teško ulje**		
		2013.	2012.	2011.	2013.	2012.	2011.
Godišnja potrošnja	m^3/god	**365.000 m^3**	275.000 m^3	76.700 m^3	-	-	148,8 t
	MWh/god	**3.489 MWh**	2.629 MWh	733 MWh	-	-	1.666,6
Toplinska vrijednost	MWh/ m^3	0,00956	0,00956	0,00956	-	-	0,0112
Cijena	€/kWh	0,0535	0,0608	0,0463	-	-	0,0164
Godišnji trošak	€/ god	186.800	159.753	33.946	-	-	27.387

Tablica – 3. Potrošnja električne energije

Potrošnja električne energije				
		2013.	2012.	2011.
Godišnja potrošnja	MWh/ god	582	383	331
Angažirana snaga	kW	510	510	510
Tarifa	-	red	red	red
Cijena	€/MWh	188,611	143,428	134,54
Godišnji trošak	€/ god	109.772	54.933	44.533
Potrošnja po procesu		**MWh/god**		
Hlađenje		233,5	175,5	136,8
Ventilacija		6	6	6
Ostalo		106,1	94,3	106,1
Motori i strojevi		126,0	83,2	64,3
Osvjetljenje		33,7	24,0	17,9

Tablica – 4. Potrošnja energije po proizvodu

Potrošnja energije - nastavak						
Potrošnja po proizvodu	Gorivo MWh/god			Električna energija MWh/god		
	2013.	2012.	2011.	2013.	2012.	2011.
Sladovina	1.884	1.477	1.404	215	139	111
Pivo u fermentaciji	-	-	-	200	129	103
Filtrirano pivo	562	449	403	63	54	56
Pakovano pivo	1.043	703	592	104	61	60

3.2 Toplinska analiza

3.2.1 Analiza cijelog procesa

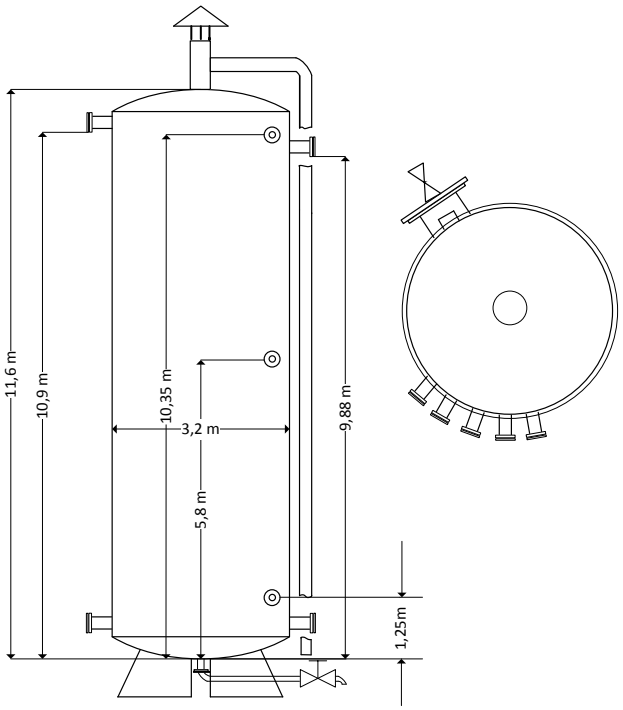
Dobra toplinska analiza procesa može se provesti primjenom *pinch* tehnologije, za koju je nužna baza podataka o svim toplim i hladnim tokovima unutar procesa. Rezultat su kompozitne krivulje koje daju uvid o iskorištenju energije na procesu. Na dijagramu se vidi koliko je potrebno dovesti energije procesu u vidu raznih energenata i koliko je potrebno energije odvesti iz procesa. Nužni podaci nalaze se u tablici 5.

Tablica – 5. Nužni podaci za toplinsku analizu procesa

	H/C	m, kg/h	m, kg/s	p,bar	Cp,kJ/kgK	Ts,K	Tt, K	Δh, kJ/kg	ΔH, kW
E1	H1-para	3.583,00	0,995	7	-	423	423	2749	2735
	C1-slad		1,38	1	3,98	323	373		274,62
E2	H2-para	1.411,00	0,392	7	-	423	423	2749	1077,61
	C2-slad		70,59	1	3,98	348	351		842,84
E3	H3-para	3.316,00	0,92	7	-	423	423	2749	2529,08
	C3-sladovina		2,85	1	3,98	351	373		249,55
E4	H4-sladovina		5,77	1	3,98	369	303		1515,66
	C4-voda		5,56	3	4,2	279	353		1728,05
E5	H5-sladovina		5,77	1	3,98	303	290		298,54
	C5-glikol		14,5	3	2,2	273	277		127,6
E6	H6-glikol		39,96	3	2,2	270	268		175,82
	C6-NH3		9,29	2	4,73	263	267		175,77
E7	H7-NH3			2	4,73	383	308		
	C7-voda			1	4,2	293	373		
E8	H8-glikol		15,54	3	2,2	279	276		102,56
	C8-NH3		4,3	2	4,73	263	268		101,69
E9	H9-para		0,255	7	1,9	423	423	2749	701
	C9-voda		8,58	2	4,2	338	353		540,54

3.2.2 Analiza spremnika topline

Spremnik topline ukupne visine 11,6 m i promjera 3,2 m izrađen je od nehrđajućeg čelika debljine stjenke 25 mm. Materijal je opran u kiselini i zatim je unutarnja stjenka premazana epoksi smolom, a vanjska cinkprotolom. Prelijevanje se događa pri visini od 10,9 m pa je iskoristivi volumen spremnika 87,7 m^3. Izolacija spremnika sastoji se od 15 cm poliuretanske pjene i 0,06 cm aluminijskog lima koji čine rebrasti zaštitni sloj. Izvedbeni nacrt spremnika dan je slikom 14. Spremnik sadrži dva otvora za dovod i četiri za odvod (ispust). Gornji dovod nalazi se na visini od 9,88 m, a donji dovod i svi odvodi na visini 0,76 m. U spremnik se dovode voda korištena za prvostupanjsko hlađenje sladovine prije procesa fermentacije u pločastom izmjenjivaču (gornji dovod) i svježa voda koja se potom grije u cijevnom izmjenjivaču vodenom parom generiranom u kotlovnici (donji dovod). U prvom slučaju je najviša temperatura vode u spremniku 80 °C, a u drugome može biti i viša. Ovisno o procesu za koji se voda upotrebljava, odvodi se kroz odgovarajući odvod. Spremnik sadrži i tri temperaturna osjetila koja se nalaze na visinima 1,25, 5,80 i 10,35 m.



Slika 14. Skica spremnika topline

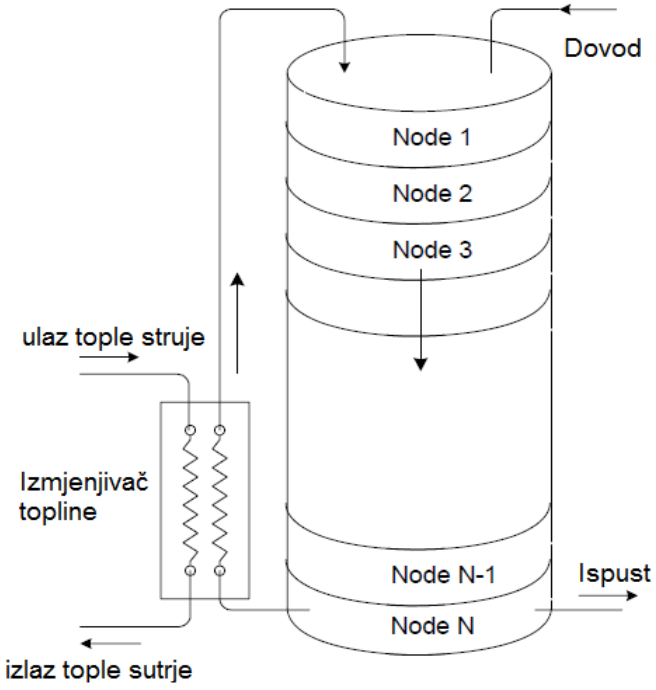
Temperaturna stratifikacija

Za sustav duž kojeg postoji temperaturna promjena možemo reći da je prisutna „toplinska“ ili temperaturna stratifikacija. Općenito, riječ je o porastu temperature fluida s visinom sustava radi različite gustoće fluida pri različitim temperaturama. Temperaturna stratifikacija unutar spremnika ovisi o izvedbi spremnika, dimenzijama, o položaju i veličini ispusta i ulaznog otvora te odgovarajućim protocima. Uočeno je da se stratifikacija povećava s omjerom visine i promjera spremnika, povećanjem temperaturne razlike fluida na ulazu i izlazu iz spremnika, povećanjem promjera dovoda i ispusta te smanjenjem protoka kroz njih. Poznavanje stratifikacije unutar spremnika topline omogućuje uporabu vode (izravnu ili uz dogrijavanje) određene temperature čime je povećana učinkovitost spremnika.

Četiri su primarna razloga zbog kojih dolazi do destratifikacije unutar spremnika topline: (i) gubici topline u okolinu, (ii) konduktivni prijenos topline iz toplih u hladne „slojeve“, (iii) vertikalna kondukcija kroz stjenku spremnika koja uzrokuje strujanje fluida uz stjenku i (iv) miješanje fluida tijekom ciklusa punjenja i pražnjenja.

Modeliranje

Simulacija temperaturne stratifikacije unutar spremnika topline provedena je pomoću demo verzije računalnog programa TRNSYS (*TRaNsient SYstem Simulation program*). Riječ je o programskom sučelju koje omogućuje projektiranje toplovodnih sustava simuliranjem ponašanja cijelog sustava i pojedinačnih elemenata od kojih se sustav sastoji. Pretežito se koristi za dinamičke simulacije rada solarnih sustava, ali i drugih obnovljivih izvora energije te gorivih ćelija i kogeneracijskih sustava, niskoenergetskih objekata i sl. Za simulaciju se koristi postojeći model TRNSYS-a koji spremnik dijeli na N slojeva konstantnog volumena – tzv. nodova (eng. *node*). Broj segmenata, N, znatno utječe na vertikalnu raspodjelu temperatura unutar spremnika dobivenu rješavanjem modela npr. u slučajevima s većim temperaturnim gradijentima, model s većim brojem N će preciznije opisati nastalu raspodjelu temperatura jer omogućuje prikaz veće stratifikacije, ako ona postoji. Podjela spremnika na N segmenata ilustrirana je slikom 13. Promjenu temperature s vremenom unutar segmenta predviđa se proračunom bilance energije za svaki segment uzimajući u obzir gubitak topline u okolinu i utjecaj susjednih segmenata (npr. protoci mase i energije, konduktivni prijenos topline između slojeva, vertikalna kondukcija kroz stjenku spremnika itd.).

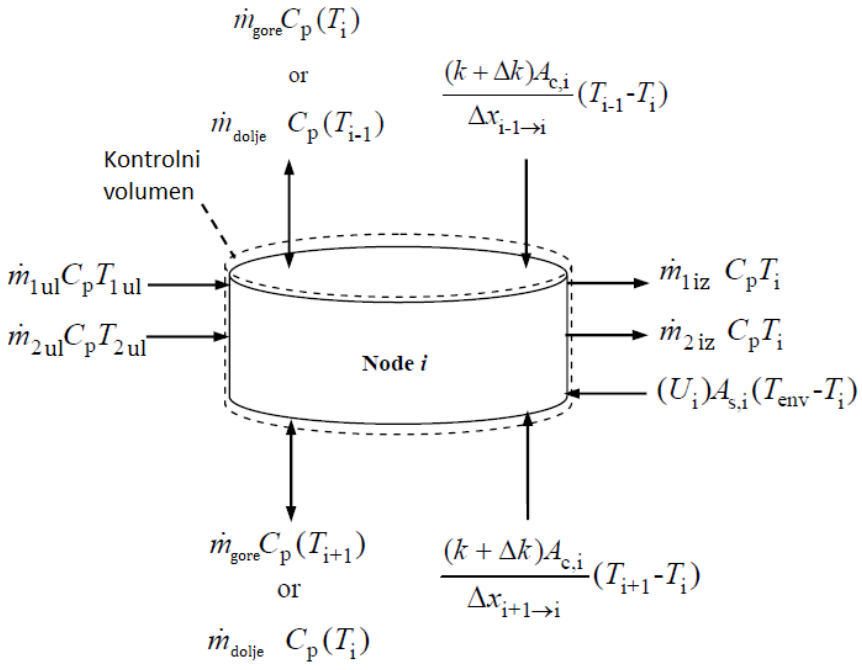


Slika 15. Model spremnika topline u programskom sustavu TRNSYS [23]

Račun raspodjele temperatura i toplinskih gubitaka uspravnog spremnika rezultat je bilanca mase i energije susjednih segmenata u skladu sa zadanim temperaturama segmenata u trenutku početka simulacije. Raspodjela temperatura rezultat je rješavanja sustava od N običnih diferencijalnih jednadžbi prvoga reda, tj. bilance energije. Bilanca energije za *i-ti* segment dana je jednadžbom (2) i slikovno prikazana na slici 16.

$$M_i M_i C_p \frac{dT_i}{dt} = \frac{(k+\Delta k)A_{c,i}}{\Delta x_{i+1\to i}}(T_{i+1}-T_i) + \frac{(k+\Delta k)A_{c,i}}{\Delta x_{i-1\to i}}(T_{i-1}-T_i) + (U_i)A_{s,i}(T_{env}-T_i) + \dot{m}_{dolje}C_p(T_{i-1}) - \dot{m}_{gore}C_p(T_i) - \dot{m}_{dolje}C_p(T_i) + \dot{m}_{gore}C_p(T_{i+1}) + \dot{m}_{1ul}C_pT_{1ul} - \dot{m}_{1iz}C_pT_{1iz} + \dot{m}_{2ul}C_pT_{2ul} - \dot{m}_{2iz}C_pT_{2iz} \quad (2)$$

Pri čemu su $\dot{m}_{dolje}$ i $\dot{m}_{gore}$ protoci fluida prema dnu, odnosno vrhu spremnika; $A_{c,i}$ i $A_{s,i}$ označavaju površinu poprečnog presjeka i površinu *i-tog* segmenta; k i Δk su koeficijent toplinske vodljivosti pohranjenog fluida i destratifikacijska konduktivnost (miješanje fluida na granicama segmenata te kondukcija uz stijenku); U_i je koeficijent prijenosa topline po jedinici površine; $\dot{m}_{ul}$ i $\dot{m}_{iz}$ su maseni protoci fluida 1 i 2 na ulazu i izlazu iz spremnika; T_{i+1}, T_i, T_{i-1}, T_{ul}, T_{iz} i T_{env} su temperature fluida u spremniku u *i-tom* te susjednim segmentima, temperature fluida na ulazu i izlazu iz spremnika te temperatura okoliša; $\Delta x_{i+1\to i}$ i $\Delta x_{i-1\to i}$ označavaju udaljenosti između središta segmenta *i* te segmenta ispod, odnosno iznad.

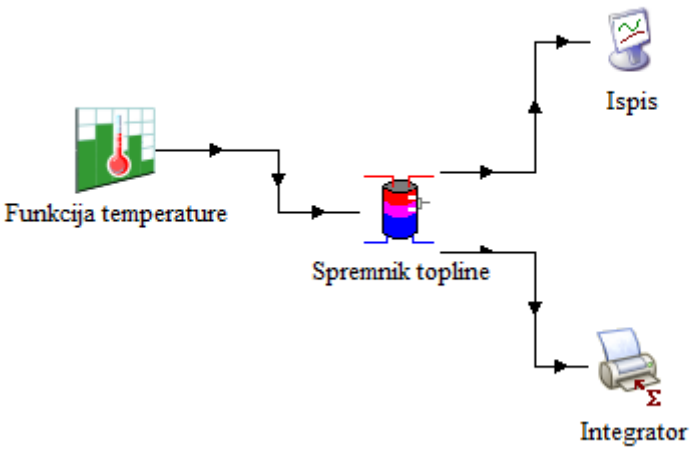


Slika 16. Tokovi topline *i-tog* segmenta [23]

Rješavanje sustava jednadžbi odvija se istovremeno jer temperatura svakog segmenta ovisi o susjednim segmentima i temperaturi okoliša. Složenost modela izrazito se povećava dodavanjem ulaznih i izlaznih struja ili pomoćnih elemenata u spremnik topline. Prilikom korištenja jednostavnog jednodimenzionalnog modela poput navedenog u obzir se moraju uzeti i određene pretpostavke:

1. Tok fluida unutar spremnika je jednodimenzionalan
2. Temperatura i gustoća fluida u svakom segmentu je tijekom jednog koraka stalna
3. Izlazni tokovi fluida svakog segmenta su potpuno izmiješani prije ulaska u susjedni segment
4. Gubitak topline u okolinu i kondukcija kroz stjenku spremnika ne uzrokuju nastanak dvo- ili tro- dimenzionalnih temperaturnih gradijenata
5. Brzine strujanja fluida iz spremnika i u spremnik su dovoljno male da ne utječu na miješanje

Simulacija spremnika provodi se u *Simulation studiju* TRNSYS-a. Riječ je o dijelu programskog sučelja gdje se odabiru komponente i način njihovog povezivanja, zadaju vrijednosti parametara i odabiru parametri čije vrijednosti će biti prikazane kao rezultat proračuna. Shema procesa korištenog u TRNSYS *Simulation studiju* prikazana je slikom 17.[23 – 28]



Slika 17. Shema modela u TRNSYS-u

S obzirom da je riječ o demo verziji programa, modeliranje je ograničeno brojem komponenata (do 5) i nekim njihovim funkcijama – poput ispisa vrijednosti do 10

parametara. Spremnik je podijeljen na 20 segmenata i provedena je simulacija ulaza vode temperature 85 °C u spremnik s razinom vode od 3,0 m i temperaturom 63 °C, odnosno procesa s kojim završava topli ciklus proizvodnje piva te se topla voda skladišti do početka novog ciklusa. Stratifikacija je određena izračunom temperatura za svakih 0,5 m spremnika, a rezultati se prikazuju za visine od 1,5 m do 6 m. Na temelju podataka o stratifikaciji određuje se visina dodatnog odvoda vode koji bi omogućio korištenje vode više temperature bez da se prethodno ispusti i voda niže temperature iz donjeg dijela spremnika.

Simulacija je provedena za tri godišnja doba (zima, proljeće, ljeto) zbog različitih okolišnih temperatura pa samim time i različitih toplinskih gubitaka spremnika koji mogu rezultirati različitom temperaturnom stratifikacijom. U obzir je uzeta postojeća te izolacija povećana za 10, 25, 50, 75 i 100 % početne debljine izolacijskog materijala (poliuretanska pjena).

3.2.3 Primjena solarnih sustava

Na motivacijskom primjeru razmotrena je mogućnost ugradnje solarnih sustava. Razvoj solarne tehnologije omogućuje integraciju s postojećim sustavima za generaciju toplinske i električne energije korištenjem pločastih i vakuumskih, odnosno fotonaponskih panela. S obzirom na to da se kod proizvodnje piva može postići znatna ušteda toplinske u odnosu na električnu energiju, razmatra se mogućnost ugradnje toplinskih solarnih kolektora. U obzir se uzimaju lokacija i pripadajući klimatski uvjeti lokalne pivovare i toplinski uvjeti procesa kod proizvodnje piva. Usporedbom pločastih i vakuumskih kolektora zaključuje se da su zbog veće adsorpcijske površine, mogućnosti postizanja viših temperatura, duljeg vijeka trajanja i uspješnije primjene u neidealnim klimatskim uvjetima prikladniji cijevni vakuumski kolektori.[29]

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1 Tokovi topline u procesu

Za kvalitetnu analizu topline nužni su podaci o tokovima toplih i hladnih struja: vrijednosti masenih protoka, početne i izlazne temperature te specifični toplinski kapacitet kako bi se izračunala količina izmijenjene topline. Podaci o toplinama za struje su prikazani u tablicama 6. – 9.

Procesne struje

Tablica – 6. Podaci o procesnim strujama korišteni za izradu *pinch* dijagrama

IZMJENJIVAČ	m, kg/h	m, kg/s	Cp, kJ /kgK	T_{ul}, K	T_{iz}, K	ΔH, kW
E1, slad	4.968,0	1,38	3,98	323	373	274,62
E2, slad	254.124	70,59	3,98	348	351	842,84
E3, sladovina	10.260	2,85	3,98	351	373	249,55
E4, sladovina	20.772	5,77	3,98	369	303	1.515,66
E5, sladovina	20.772	5,77	3,98	303	290	298,54
UKUPNO	**310.896**	**86,36**				**3.181,2**

UKUPNO = 3181 kW/šarži x 240 šarži = 763.490 kWh = **763,5 MWh/godišnje**

Pomoćni mediji

Tablica – 7. Podaci o masenim protocima pare korišteni za izradu *pinch* dijagrama

IZMJENJIVAČ	m, kg/h	m, kg/s	Δh, kJ /kg	T, K	ΔH, kW
E1	1781 1336 466	0,495 0,371 0,129	2749	423	1.360,76 1.019,88 356,62
E2	1411	0,392	2749	423	1.077,61
E3	919 2397	0,255 0,666	2749	423	701 1.830,83
E9	914	0,254	2749	423	698,25
UKUPNO	**9224**	**2,56**			**7.044,95**

UKUPNO = 7.045 kW/šarži x 240 šarži = 1.690.800,0 kW = **1690,8 MWh/godišnje**

Tablica – 8. Podaci o vodi korišteni za izradu *pinch* dijagrama

IZMJENJIVAČ	m, kg/h	m, kg/s	Cp, kJ /kgK	T_{ul}, K	T_{iz}, K	ΔH, kW
E4	20.000,0	5,56	4,19	279	353	1.724,00
E9	30.900,0	8,58	4,19	338	353	539,25
UKUPNO	**50.900,0**	**14,14**				**2.263,00**

UKUPNO = 2.263 kW/šarži x 240 šarži = 543.120,0 kW = **543,12 MWh/godišnje**

Tablica – 9. Podaci o glikolu korišteni za izradu *pinch* dijagrama

IZMJENJIVAČ	m, kg/h	m, kg/s	Cp, kJ /kgK	T_{ul}, K	T_{iz}, K	ΔH, kW
E5	52.200,0	14,5	2,2	273	277	127,60
E6	143.856,0	39,96	2,2	270	268	175,82
E8	55.944,0	15,54	2,2	279	276	102,56
UKUPNO	**55750**	**1,364**				**405,98**

UKUPNO = 405,98 kW/šarži x 240 šarži = 97.435,20 kW = **97,4 MWh/godišnje**

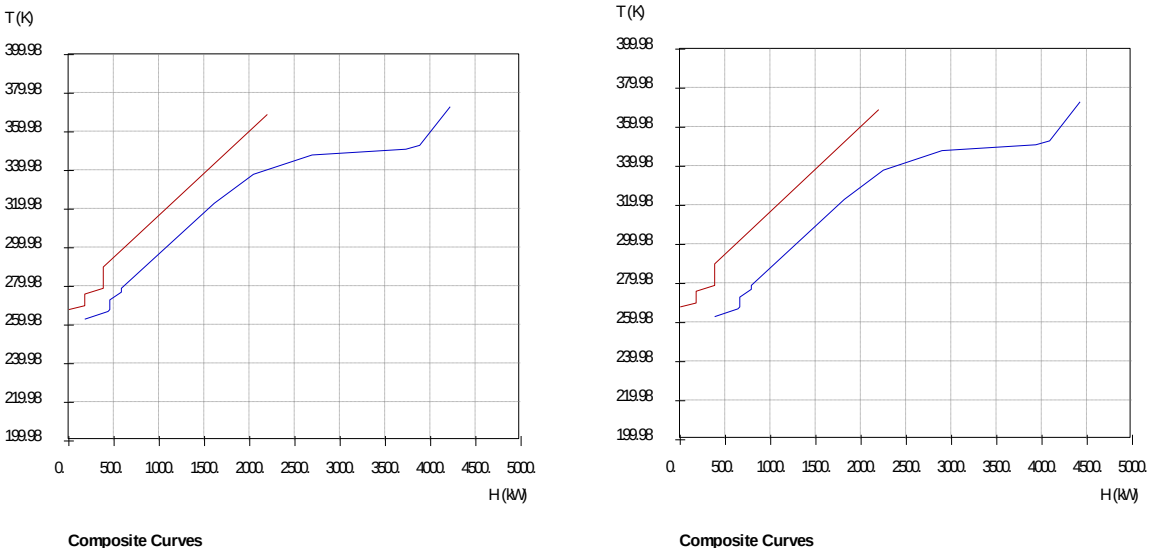
4.2 Rezultati *pinch* analize

Na temelju prikupljenih podataka izrađene su toplinske krivulje pomoću proračunske tablice *Excel solvera – Pinch spreadsheets*. U tablici 10. su prikazani uneseni podaci, a kompozitne krivulje prikazane su slikama 18. i 19.

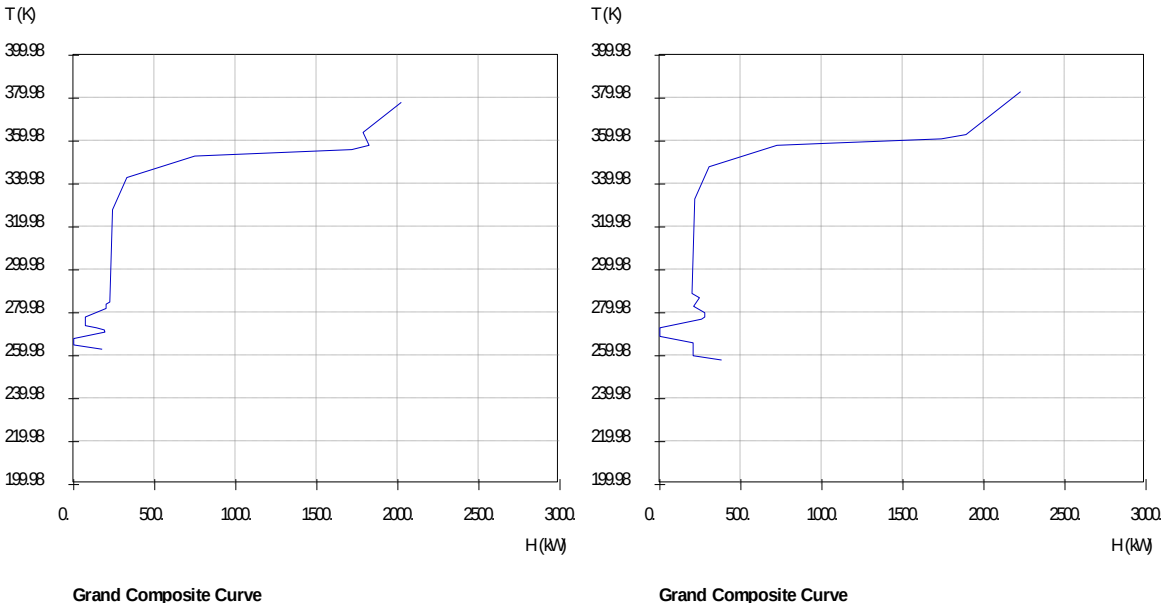
Tablica – 10. Rezultati toplinske analize provedene u proračunskim tablicama *Excel solvera.*

Protok	Opis	Type	Heat type	T1 (K)	T2 (K)	H (kW)	mcp (kW/K)
1	C1	Cold	Sensible	323.	373.	274.5	5.49
2	C2	Cold	Sensible	348.	351.	842.7	280.9
3	C3	Cold	Sensible	351.	373.	249.6	11.34
4	H4	Hot	Sensible	369.	303.	-1515.36	22.96
5	C4	Cold	Sensible	279.	353.	1727.9	23.35
6	H5	Hot	Sensible	303.	290.	-298.48	22.96
7	C5	Cold	Sensible	273.	277.	127.6	31.9
8	H6	Hot	Sensible	270.	268.	-175.8	87.9
9	C6	Cold	Sensible	263.	267.	175.6	43.9
10	H8	Hot	Sensible	279.	276.	-102.6	34.2
11	C8	Cold	Sensible	263.	268.	101.5	20.3
12	C9	Cold	Sensible	338.	353.	540.5	36.03
13	H8	Hot	Sensible	279.	276.	-102.56	34.19

Kompozitne krivulje (CC i GCC)



Slika 18. Kompozitne krivulje (ΔT_{min} = 10 ^{0}C i ΔT_{min} = 20 ^{0}C)

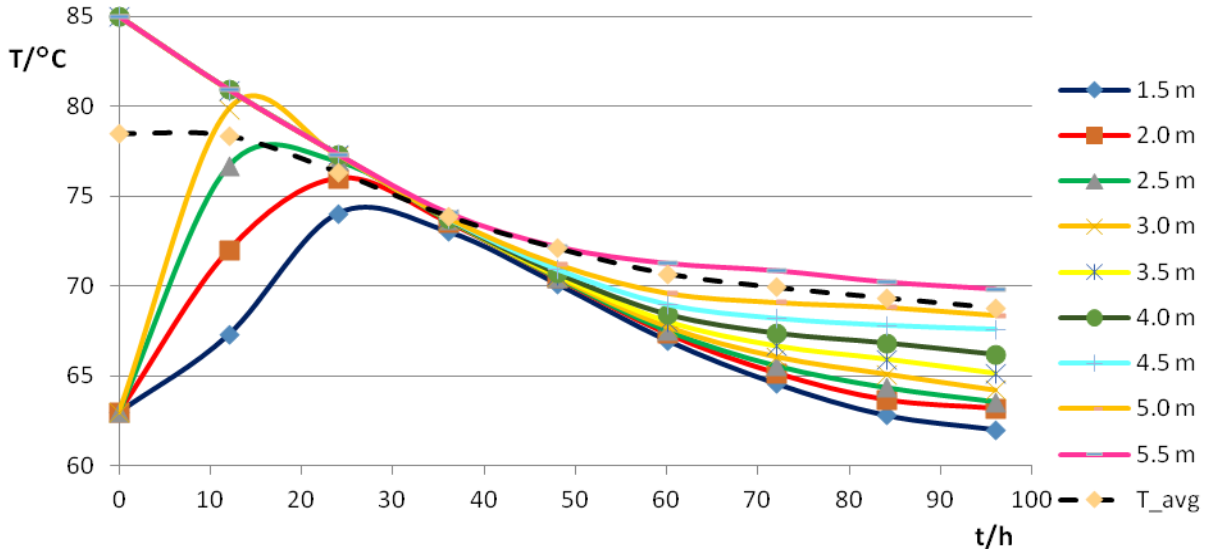


Slika 19. Velika kompozitna krivulja (ΔT_{min} = 10 ^{0}C i ΔT_{min} = 20 ^{0}C)

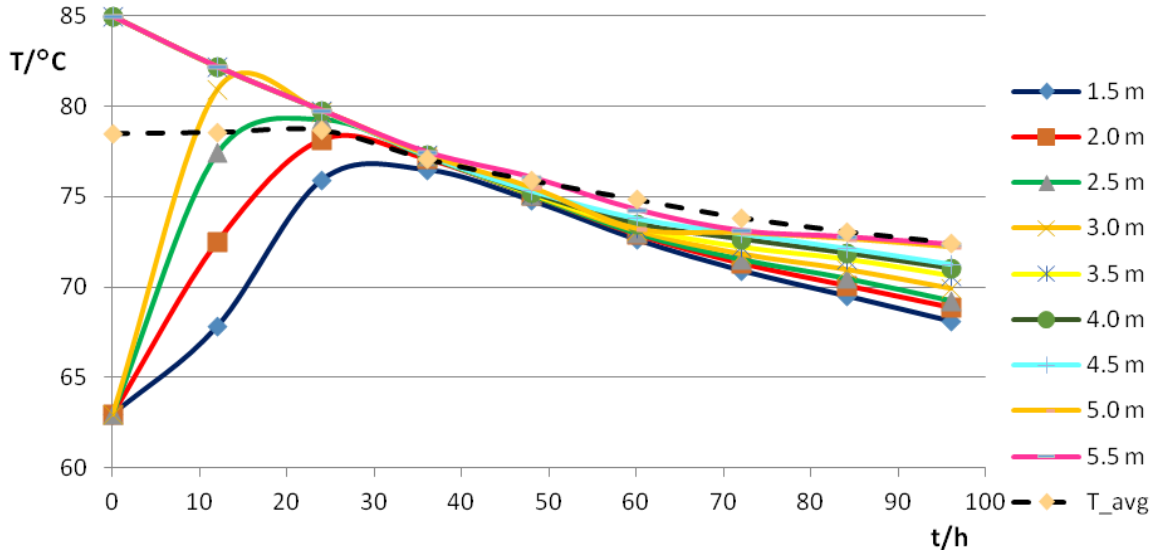
Kompozitne krivulje prikazuju da minimalna količina energije koju je potrebno dovesti toplim medijem iznosi 2.020,9 kW/šarži (2.226,0 kW/šarži), a minimalna energija koju je potrebno ukloniti hlađenjem iznosi 175,8 kW/šarži (381,0 kW/šarži). *Pinch* temperatura iznosi 268 K (-5 °C) / 273 K (0 °C). U usporedbi s tablicom 7 vidljivo je da se troši oko 4820 kW topline više nego što je potrebno.

4.3 Rezultati analize spremnika

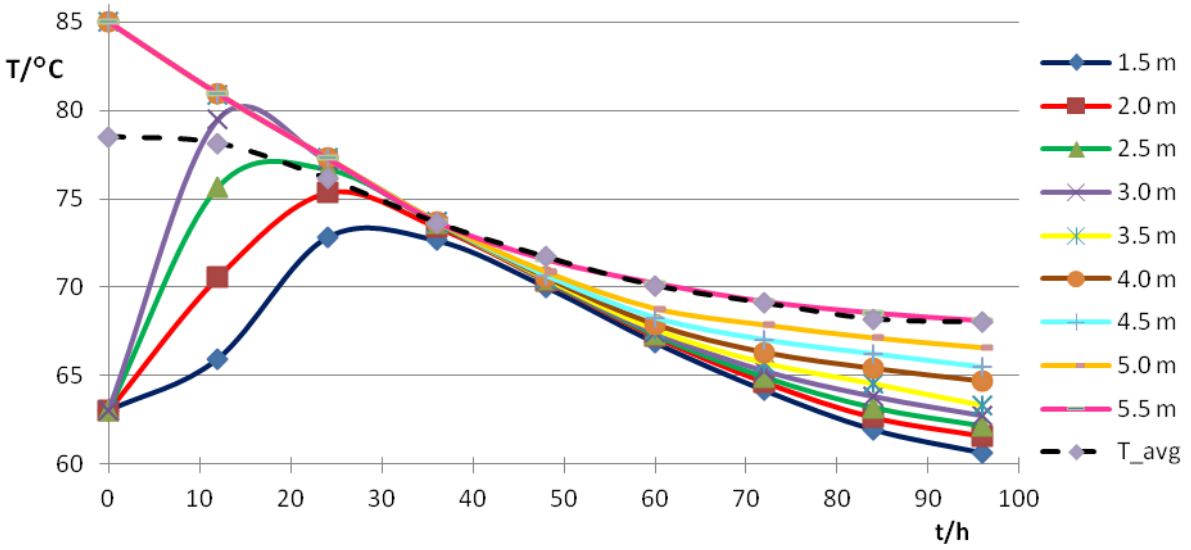
Podaci o temperaturnoj stratifikaciji unutar spremnika za postojeću debljinu izolacije izračunati računalnim programom TRNSYS prikazani su slikama 20. – 25. Tablični prikaz podataka dan je u prilogu, u tablicama 12. – 20.



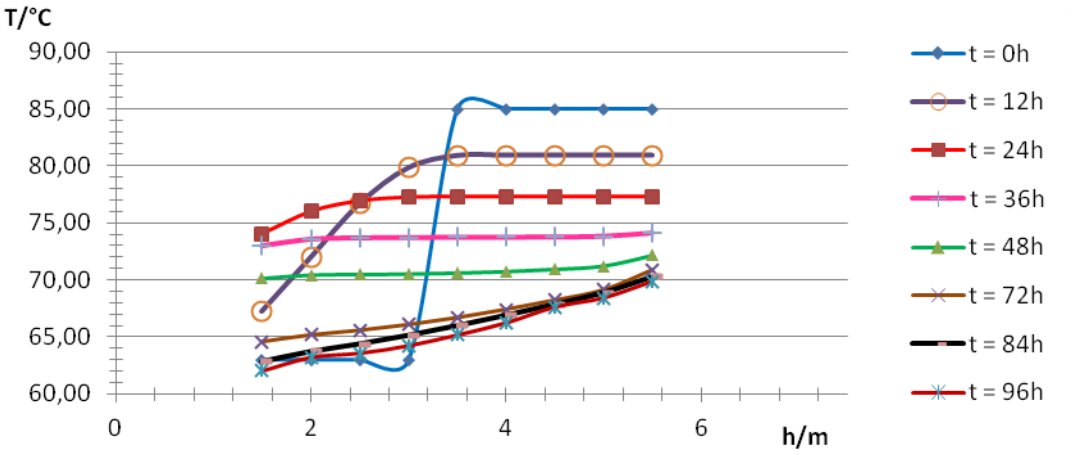
Slika 20. Promjena temperature segmenata spremnika s vremenom - proljeće



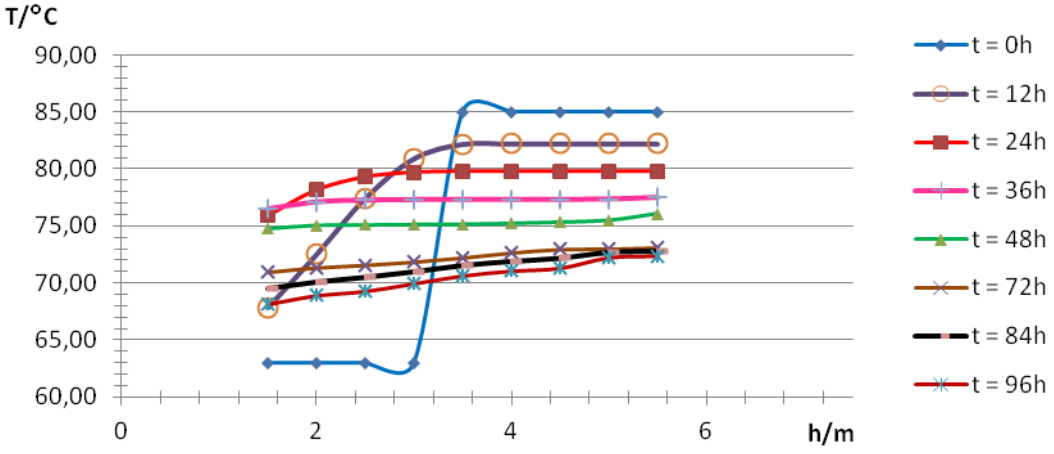
Slika 21. Promjena temperature segmenata spremnika s vremenom - ljeto



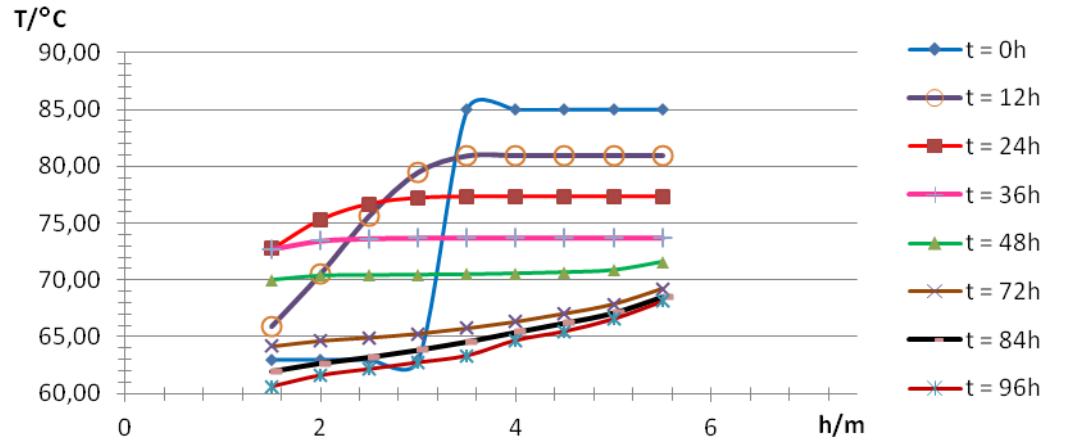
Slika 22. Promjena temperature segmenata spremnika s vremenom – zima



Slika 23. Promjena temperature vode s visinom u vremenu – proljeće



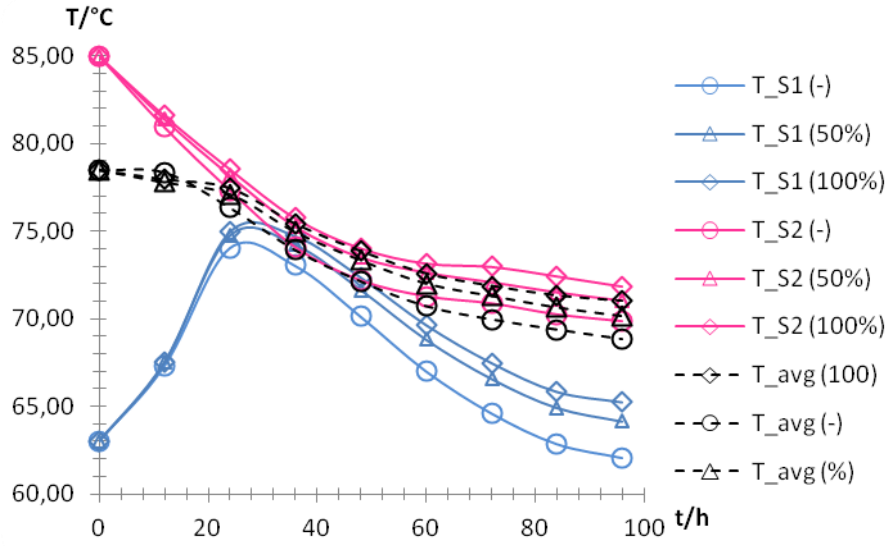
Slika 24. Promjena temperature vode s visinom u vremenu – ljeto



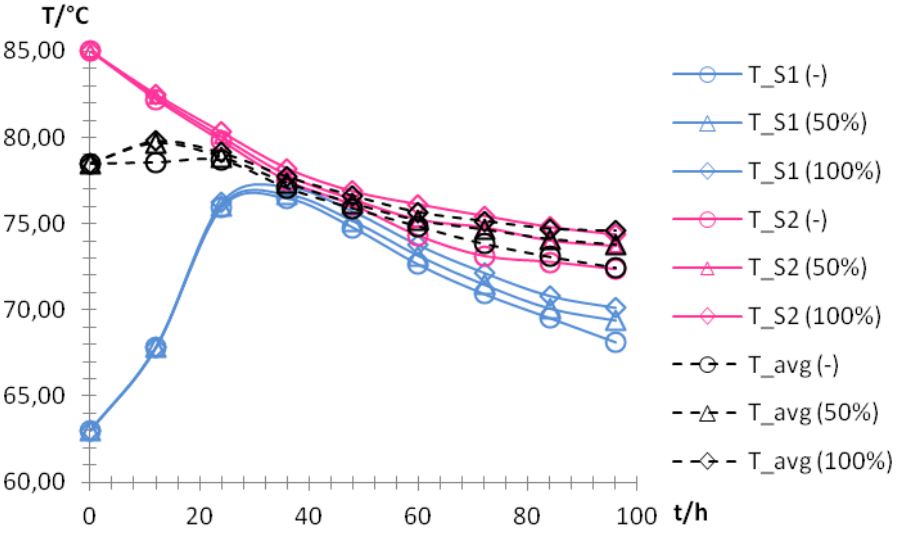
Slika 25. Promjena temperature vode s visinom u vremenu – zima

Iz priloženih slika uočljive su različite temperaturne stratifikacije vode u spremniku topline u različitim dobima godine. Razlika između temperatura segmenata raste sa sniženjem temperature okoliša pa je najveći stupanj stratifikacije u spremniku zimi, a najmanji ljeti. Iz toga se može zaključiti da velik utjecaj na stupanj stratifikacije ima okolni zrak koji hladi vodu u spremniku. U početnim satima nakon ulaza vode temperature 85 °C hladnijim slojevima temperatura raste, a toplijim pada. U vremenu između 30 i 50 h temperature segmenata najmanje se razlikuju te je temperatura spremnika gotovo jednolika što je posebice vidljivo na slikama 21. – 23. Period jednolike temperature nešto je kraći zimi, a dulji ljeti. S vremenom opet dolazi do porasta temperaturne stratifikacije uslijed djelovanja hladnijeg okolnog zraka. No stupanj stratifikacije se ne povećava u nedogled, već dolazi do privremene stabilizacije i nastanka razlike od 0,75 do 1,75 °C između slojeva. Snižavanjem temperatura slojeva u spremniku smanjuje se temperaturna razlika s okolinom pa ne dolazi do daljnjeg rasta stupnja stratifikacije.

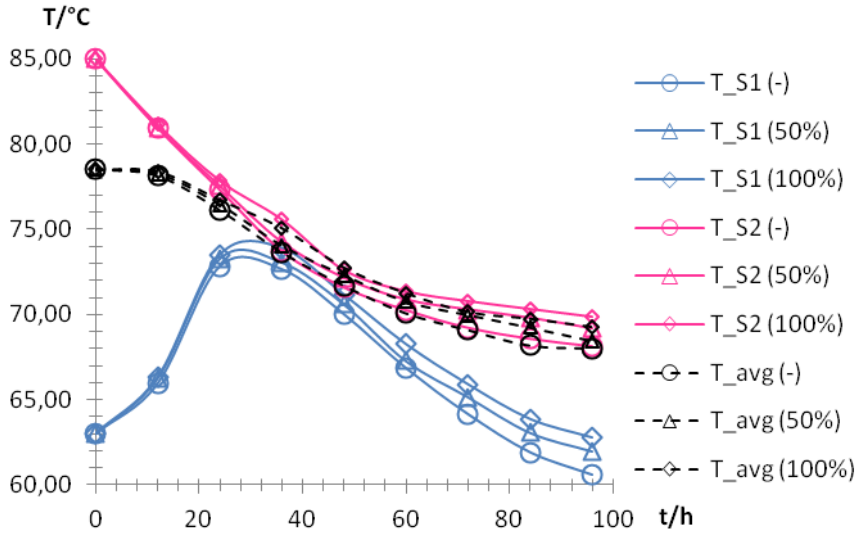
Slike 26. – 28. prikazuju temperature slojeva vode koji se preklapaju s položajima temperaturnih osjetila u spremniku topline lokalne pivovare te promjenu prosječne temperature vode u spremniku. Osjetilo smješteno najbliže vrhu nije uzeta u obzir s obzirom na to da razina vode u spremniku najčešće ne prelazi 7,5 m, a osjetilo se nalazi na visini 10,35 m. Prikazani su odabrani rezultati spremnika s trenutnom debljinom sloja izolacije te povećanjem debljine sloja za 50 i 100 %. Tablični prikaz rezultata nalazi se u prilogu.



Slika 26. Odabrani rezultati promjena temperatura – proljeće



Slika 27 Odabrani rezultati promjena temperatura – ljeto



Slika 28. Odabrani rezultati promjena temperatura – zima

Na slikama 26. – 28. prikazani su odabrani rezultati promjena temperatura slojeva vode čija visina odgovara položaju temperaturnih osjetila u spremniku topline i prosječne temperature unutar spremnika u uvjetima postojeće te izolacije povećane za 50 i 100 % početne debljine sloja PU.

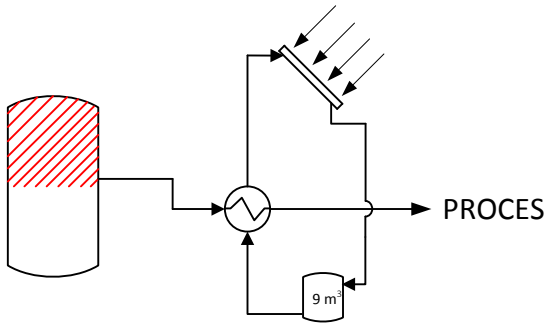
Iz priloženih grafova mogu se još jednom uočiti različite vrijednosti temperatura slojeva i prosječne temperature vode u različitim godišnjim dobima. Povećanjem debljine sloja izolacije za 50 i 100 % temperature slojeva i prosječna temperatura bit će očekivano viši, posebice za dulja razdoblja između ciklusa punjenja i pražnjenja spremnika. Razlika u temperaturama slojeva izraženija je za povećanje debljine sloja izolacije za 50 % u odnosu na postojeću izolacije nego između vrijednosti temperatura dvaju povećanja debljine sloja. S obzirom na to da je cilj odrediti položaj dodatnog ispusta kako bi se omogućilo direktno korištenje vode više temperature, iz podataka o stratifikaciji se može zaključiti da već 12h nakon dovoda vruće vode u spremnik, temperatura niti jednog sloja nije viša od 80 °C potrebnih za proces vrenja sladovine, bez obzira na poboljšanu izolaciju. To znači da se dodavanjem ispusta ne može izbjeći dogrijavanje vode u vanjskome izmjenjivaču na željenih 80 °C. Ipak, temperature vode na polovici spremnika su nakon 96 h više za 5 (ljeti) do 10 °C (zimi) od temperatura slojeva pri dnu pa bi se dodavanjem ispusta i korištenjem vode iz gornje polovice spremnika smanjio iznos topline koju je potrebno dovesti za dogrijavanje.

Dodatno smanjenje može se postići povećanjem razine vode u spremniku s dosadašnjih 7,5 m na 10 m. Svaki 1 m razine je 8 m^3 vode te bi se time omogućilo dodatnih 20 m^3 vode više temperature.

4.4 Rezultati analize primjene solarnih sustava

U skladu s samoodrživim razvojem i smanjenjem ovisnosti o fosilnim gorivima predlaže se korištenje vakuumskih solarnih panela za osiguravanje topline potrebne za dogrijavanje vode. Shema sustava za dogrijavanje viših slojeva vode u spremniku dana je slikom 29. Predložena visina dodatnog ispusta je 6 m što bi s povećanjem razine na 10 m omogućilo korištenje 32 m^3 vode povišene temperature. Voda bi se prije odlaska u proces dogrijala u vanjskom izmjenjivaču topline gdje bi toplu struju činila voda zagrijana cijevnim vakuumskim solarnim kolektorima i skladištena u pomoćnom spremniku volumena 9 m^3 (oko 10 % volumena glavnog spremnika topline). U tablici 11. navedene su vrijednosti prosječne

temperature vode dostupne dodavanjem ispusta (T_avg), topline potrebne za dogrijavanje vode na 82 °C u vanjskome izmjenjivaču (Q) i apsorpcijske i ukupne površine kolektora koji toplinu Q moraju osigurati, (A, A_uk).



Slika 29. Shema spremnika s dodatnim ispustom vode i sustavom za dogrijavanje sa solarnim vakuumskim panelima.

Tablica – 11. Toplina koju trebaju osigurati kolektori, Q, i pripadajući broj i površina toplinskih kolektora

	Proljeće			Ljeto			Zima		
	-	50%	100%	-	50%	100%	-	50%	100%
T_avg, °C	72,8	73,7	74,4	74,9	76,4	77,3	71,9	72,4	73,3
Q, kW	330,82	298,46	273,29	255,31	201,37	169,01	363,18	345,20	312,84
Q, MWh/god	79,40	71,63	65,59	61,27	48,33	40,56	87,16	82,85	75,08
Broj kolektora	16	15	13	13	10	8	18	17	15
A, m^2	46,08	41,57	38,06	35,56	28,05	23,54	50,59	48,08	43,57
A_uk, m^2	52,08	46,99	43,02	40,19	31,70	26,61	57,18	54,35	49,25

Pojedini solarni panel sadrži 18 cijevi te mu kapacitet iznosi 2,6 L vode, a cijena mu iznosi 1.420 €. Apsorpcijska površina iznosi 2,84 m^2, a ukupna 3,21 m^2. S obzirom na izračunate vrijednosti ukupne površine potrebno je od 8 – 18 solarnih kolektora za dogrijavanje vode na željenu temperaturu.

Cijena za kupnju potrebnih kolektora iznosi 8 (18) * 1.420 € = 8.142 € (18.320 €).

Cijena pomoćnog spremnika i vanjskog izmjenjivača procijenjena je između 14.000 za 8 i 30.000 € za 18 solarnih panela.

5. ZAKLJUČCI

U ovom radu razmotrena je mogućnost povećanja učinkovitosti spremnika topline kod proizvodnje piva dodavanjem ispusta, povećanjem sloja izolacije te primjenom solarnih sustava. Provedena je i toplinska analiza procesa *pinch* postupkom koja ukazuje na stvarne potrebe za toplinskom i/ili rashladnom energijom koja je potrebna sustavu. Na temelju rezultata dobivenih toplinskom analizom i modeliranjem temperaturne stratifikacije u spremniku u uvjetima različitih godišnjih doba i različitih debljina sloja izolacije u programskom sustavu TRNSYS, možemo zaključiti sljedeće:

- Iz toplinskih bilanci koje se baziraju na stvarnim podacima vidljivo je da se u procesu troši dvostruko više pare nego što je potrebno.
- Povećanjem debljine sloja izolacije za 100% ne može se spriječiti sniženje temperature vode ispod 80 °C za period pohrane od 12 h ili više, što onemogućuje direktnu primjenu vode u procesu vrenja.
- Dodavanjem ispusta smještenog bliže vrhu spremnika omogućuje se dogrijavanje vode više početne temperature čime se smanjuje količina energije potrebna za dogrijavanje.
- Dodatno smanjenje moguće je postići povećanjem razine vode u spremniku sa sadašnjih 7,5 m na 10 m. Svaki 1 m razine je 8 m^3 vode te bi se time omogućilo dodatnih 20 m^3 vode više početne temperature. Radi nedostatka mjerenih podataka na procesu nije bilo moguće validirati model temperaturne stratifikacije.
- Predložena visina ispusta kojom bi se osigurala količina vode potrebna za proces vrenja je 6 m. Umjesto dogrijavanja vode parom iz kotlova predlaže se primjena solarnih sustava.
- Ugradnjom solarnih panela moguća je postići uštedu energije između 40 i 88 MWh godišnje.
- Podaci za uštedu energije primjenom solarnih sustava su procijenjeni uz maksimalni stupanj djelotvornosti panela.

6. LITERATURA

1. *Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques in the Food Drink and Milk Industries*, August 2006

2. Lauterbach C., Schmitt B., Vajen K., Jordan U., *Solar Process Heat in Breweries – Potential and Barriers of a New Application Area*, Proc. ISES Solar World Congress, Johannesburg (SA), 11-14.10.2009., str. 671-679

3. U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (http://www2.epa.gov/rhc/rhc-breweries) dostupno 12. rujna 2015.

4. www.eihp.hr

5. Bañosa R., Manzano-Agugliaro F., Montoya F. G., Gila C., Alcayde A., Gómez J., *Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review,* Renew. Sust. Energ. Rev. 15 (2011) 1753–1766

6. Majozi T, *Minimization of energy use in multipurpose batch plants using heat storage: an aspect of clener production*, J. Clean. Prod. 10 (2009) 945–950

7. Adonyi R., Romero J., Puigjaner L., Friedler F., *Incorporating heat integration in batch process scheduling*, Appl. Therm. Eng. 23 (2003) 1743–1762

8. Muster-Slawitsch B., Weiss W., Schnitzer H., Brunner C., *The green brewery concept: Energy efficiency and the use of renewable energy sources in breweries*, Appl. Therm. Eng. 31 (2011) 2123–2134

9. Dumbliauskaite M., Becker H., Maréchal F., *Utility Optimization in a Brewery Process Based on Energy Integration Methodology*, Proceedings of ECOS, 2010., str. 91–98

10. Kemp I.C., *Pinch Analysis and Process Integration*, Elsevier, Amsterdam, 2007., str. 257–273

11. El Halwagi M. M., *Process Integration for Sustainable Design: Systematic Tools and Industrial Applications*, Texas A&M University, PASI 19.–29.07.2011.

12. Dincer I., Rosen M. A., Thermal energy storage : systems and applications / 2nd ed., Wiley, 2011. str. 51–77, 83–129

13. Schreiber H., Klitzing B., Lanzerath F., Gebhardt A., Bardow A., *Integrating cogeneration and heat storage for an energy-efficient industrial batch process*, Institute of Technical Thermodynamics; JARA|ENERGY; RWTH Aachen University, Schinkelstr. 8, 52062 Aachen

14. E Source Companies LLC., *Managing Energy Costs in Microbreweries*, 2010.

15. Priest F. G., Stewart G. G., *Handbook of Brewing*, Second Edition, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006., str. 77–97, 150–157, 385–390, 414–441, 477–486

16. Matijašević Lj., *Održive tehnologije u procesima proizvodnje piva*, Kem. Ind., 64 (9-10) (2015) 540–546

17. Sorrell S., *Reducing barriers to energy efficiency in public and private organisations: Barriers to energy efficiency in the UK Brewing sector*, SPRU (Science & Technology Policy Research), University of Sussex, Falmer, Brighton, East Sussex, 2000. str. 103–109

18. The Carbon Trust Industrial, *Energy Efficiency Accelerator–Guide to the brewing sector*, London, August 2011, str. 27–40

19. Galitsky C., Martin N., Worrell E., Lehman B., *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Breweries–An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers*, University of California, Berkley, 2003., str. 13–19

20. Willaert R. G., Baron G. V., *Applying sustainable technology for saving primary energy in the brewhouse druing beer brewing*, Clean. Techn. Environ. Policy 7 (2005), 15–32

21. Atkins M., J., Walmsley M. R. W., Morrison A. S., *Integration of solar thermal for improved energy efficiency in low-temperature-pinch industrial processes*, Energy, 35 (5) (2010), 1867–1873

22. Grahovac M., *Modeling and Optimization of Energy Generation and Storage Systems for Thermal Conditioning of Buildings Targeting Conceptual Building Design*, doktorska disertacija, Technische Universität München, 2012. str. 27–29

23. Cruickshank C. A., *Evaluation of a stratified multi-tank thermal storage for solar heating applications*, doktorska disertacija, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 2009., str. 44–57

24. *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption–Fundamentals, Case Studies and Design*, edited by Paksoy H. Ö., NATO Science Series, Series II: Mathematics, Physics and Chemistry–Vol. 234, Izmir, Turkey, 6.–17.06.2005.

25. Kleinbach E. A., *Performance Study of One-Dimensional Models for Stratified Thermal Storage Tank*, University of Wisconsin-Madison, magistarski rad, University of Wisconsin-Madison, 1990., str. 2–19

26. Wetter M. *Modelica Library for Building Heating, Ventilation and Air-Conditioning Systems*, Proceedings of the 7th International Modelica Conference, 20.–22., 2009.

27. Han, Y.M., R.Z. Wang, and Y.J. Dai, *Thermal stratification within the water tank* Renew. Sust. Energ. Rev., (2009) 13(5): p. 1014-1026.

28. *TRNSYS 17 – a TRaNsient SYstem Simulation program*, Volume 4 Mathematical Reference, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2009.

29. Comerford W., *Dispelling the Solar Myth - Evacuated Tube versus Flat Plate Panels*, Sales Manager Ireland Kingspan Renewables Ltd.

POPIS SIMBOLA

A	adsorpcijska površina solarnih kolektora, m^2
A_uk	ukupna površina solarnih kolektora, m^2
$A_{c,i}$	površina poprečnog presjeka *i-tog* segmenta, m^2
$A_{s,i}$	površina *i-tog* segmenta, m^2
Cp	specifični toplinski kapacitet, kJ/(kg · K)
E_i	izmjenjivač topline, eng. *Heat **E**xchanger*
Γ	gustoća pohrane energije, kW/m^3
ΔH	sadržaj topline, kW
Δh	entalpija, kJ/kg
k	koeficijent toplinske vodljivosti, W/(m · K)
Δk	koeficijent destratifikacijske kondukcije kJ/(h · mK)
m	maseni protok, kg/s ili kg/h
$\dot{m}_{dolje}$	maseni protok fluida prema dnu spremnika, kg/s
$\dot{m}_{gore}$	maseni protok fluida prema vrhu spremnika, kg/s
$\dot{m}_{ul}$	maseni protok fluida 1 i 2 na ulazu iz spremnika, kg/s
$\dot{m}_{iz}$	maseni protok fluida 1 i 2 na izlazu iz spremnika, kg/s
p	tlak, bar
Q	toplina, kW
T	termodinamička temperatura, K
t	vrijeme, s ili h
ΔT_{min}	minimalna razlika temperatura, K
T_avg	prosječna vrijednost temperature, °C
T_{env}	temperatura okoline, °C
T_Si (-)	temperatura u spremniku pri odgovarajućoj visini toplinskog osjetila i povećanju debljine izolacijskog sloja, °C, (%)

T_i	temperatura i–tog segmenta, K
T_{iz}	temperatura fluida u izlaznoj struji, K
Ts	početna temperatura, K
Tt	ciljana temperatura, K
T_{ul}	temperatura fluida u ulaznoj struji, K
U_i	koeficijent prijenosa topline, W/(m^2·K)
$\Delta x_{i+1,i}$	udaljenost između središta segmenta *i* te segmenta ispod
$\Delta x_{i-1,i}$	udaljenost između središta segmenta *i* te segmenta iznad

POPIS OZNAKA

BAT	najbolje raspoložive tehnike, eng. ***B**est **A**vailable **T**echniques*
BREF	referentni dokument za izbor najboljih raspoloživih tehnika, eng. ***B**est Available Techniques **Ref**erence Document*
C	hladna struja, eng. ***C**old stream*
CC	kompozitna krivulja, eng. ***C**omposite **C**urve*
EC	Europska komisija, eng. ***E**uropean **C**omission*
EPA	američka agencija za zaštitu okoliša, eng. ***E**nvironmental **P**rotection **A**gency*
FDM	industrija hrane, pića i mlijeka, eng. ***F**ood-**D**rink-**M**ilk*
GCC	velika kompozitna krivulja, eng. ***G**rand **C**omposite **C**urve*
H	topla struja, eng. ***H**ot stream*
HEN	mreža izmjenjivača topline. eng. ***H**eat **E**xchanger **N**etwork*
HVAC	sustav grijanja, ventilacije i klimatizacije prostorija, eng. ***H**eating, **V**entilation and **A**ir **C**onditioning*
IPPC	objedinjeno sprječavanje i kontrola onečišćenja, eng. ***I**ntegrated **P**ollution **P**revention and **C**ontrol*
PU	poliuretan
TES	tehnologija pohrane toplinske energije eng. ***T**hermal **E**nergy **S**torage*
TRNSYS	računalni program koji se koristi za dinamičke simulacije promjenjivih (tranzijentnih) sustava eng. ***TR**a**N**sient **SY**stem **S**imulation program*

PRILOZI

U prilogu se nalaze tablični podaci prema kojima su izrađene slike iz poglavlja 4.3

Tablica – 12. Podaci po kojima je izrađen dijagram na slici 20.

t/h	T1/°C	T2/°C	T3/°C	T4/°C	T5/°C	T6/°C	T7/°C	T8/°C	T9/°C	T_avg/°C
0	63,00	63,00	63,00	63,00	85,00	85,00	85,00	85,00	85,00	78,50
12	67,30	72,00	76,68	79,84	80,92	80,94	80,94	80,94	80,94	78,37
24	74,05	76,02	76,95	77,27	77,33	77,33	77,33	77,33	77,33	76,35
36	73,04	73,58	73,69	73,72	73,73	73,74	73,77	73,82	74,09	73,92
48	70,13	70,44	70,48	70,53	70,61	70,74	70,94	71,24	72,19	72,13
60	67,00	67,38	67,54	67,76	68,06	68,47	68,99	69,64	71,28	70,71
72	64,59	65,18	65,58	66,08	66,69	67,41	68,22	69,12	70,87	69,95
84	62,83	63,70	64,37	65,12	65,96	66,87	67,83	68,85	70,24	69,37
96	62,03	63,22	63,58	64,23	65,17	66,23	67,61	68,41	69,85	68,82

Tablica – 13. Podaci po kojima je izrađen dijagram na slici 21.

t/h	T1/°C	T2/°C	T3/°C	T4/°C	T5/°C	T6/°C	T7/°C	T8/°C	T9/°C	T_avg/°C
0	63,00	63,00	63,00	63,00	85,00	85,00	85,00	85,00	85,00	78,50
12	67,85	72,52	77,43	80,91	82,18	82,20	82,20	82,20	82,20	78,57
24	75,93	78,15	79,28	79,69	79,77	79,78	79,78	79,78	79,78	78,68
36	76,47	77,08	77,24	77,28	77,29	77,29	77,30	77,33	77,47	77,08
48	74,78	75,07	75,10	75,13	75,16	75,23	75,34	75,50	76,07	75,90
60	72,63	72,91	72,99	73,11	73,28	73,51	73,82	73,22	74,28	74,85
72	70,92	71,32	71,55	71,84	72,21	72,66	72,97	73,00	73,11	73,84
84	69,53	70,10	70,51	70,99	71,54	71,89	72,17	72,67	72,77	73,09
96	68,13	68,89	69,27	69,94	70,62	71,04	71,29	72,21	72,35	72,46

Tablica – 14. Podaci po kojima je izrađen dijagram na slici 22.

t/h	T1/°C	T2/°C	T3/°C	T4/°C	T5/°C	T6/°C	T7/°C	T8/°C	T9/°C	T_avg/°C
0	63,00	63,00	63,00	63,00	85,00	85,00	85,00	85,00	85,00	78,50
12	65,93	70,54	75,65	79,47	80,91	80,94	80,94	80,94	80,94	78,13
24	72,80	75,34	76,69	77,21	77,32	77,32	77,32	77,32	77,32	76,13
36	72,65	73,43	73,64	73,70	73,72	73,72	73,72	73,72	73,72	73,65
48	70,02	70,39	70,43	70,46	70,50	70,57	70,68	70,87	71,58	71,70
60	66,86	67,22	67,31	67,43	67,62	67,90	68,28	68,79	70,24	70,08
72	64,16	64,65	64,92	65,27	65,74	66,32	67,03	67,86	69,21	69,10
84	61,92	62,65	63,18	63,82	64,56	65,41	66,23	67,13	68,56	68,19
96	60,60	61,59	62,14	62,73	63,33	64,69	65,48	66,57	68,12	68,01

Tablica – 15. Podaci po kojima je izrađen dijagram na slici 23.

h/m|t/h	0	12	24	36	48	60	72	84	96
1,5	63,00	67,30	74,05	73,04	70,13	67,00	64,59	62,83	62,03
2,0	63,00	72,00	76,02	73,58	70,44	67,38	65,18	63,70	63,22
2,5	63,00	76,68	76,95	73,69	70,48	67,54	65,58	64,37	63,58
3,0	63,00	79,84	77,27	73,72	70,53	67,76	66,08	65,12	64,23
3,5	85,00	80,92	77,33	73,73	70,61	68,06	66,69	65,96	65,17
4,0	85,00	80,94	77,33	73,74	70,74	68,47	67,41	66,87	66,23
4,5	85,00	80,94	77,33	73,77	70,94	68,99	68,22	67,83	67,61
5,0	85,00	80,94	77,33	73,82	71,24	69,64	69,12	68,85	68,41
5,5	85,00	80,94	77,33	74,09	72,19	71,28	70,87	70,24	69,85

Tablica – 16. Podaci po kojima je izrađen dijagram na slici 24.

h/m|t/h	0	12	24	36	48	60	72	84	96
1,5	63,00	67,85	75,93	76,47	74,78	72,63	70,92	69,53	68,13
2,0	63,00	72,52	78,15	77,08	75,07	72,91	71,32	70,10	68,89
2,5	63,00	77,43	79,28	77,24	75,10	72,99	71,55	70,51	69,27
3,0	63,00	80,91	79,69	77,28	75,13	73,11	71,84	70,99	69,94
3,5	85,00	82,18	79,77	77,29	75,16	73,28	72,21	71,54	70,62
4,0	85,00	82,20	79,78	77,29	75,23	73,51	72,66	71,89	71,04
4,5	85,00	82,20	79,78	77,30	75,34	73,82	72,97	72,17	71,29
5,0	85,00	82,20	79,78	77,33	75,50	73,00	73,00	72,67	72,21
5,5	85,00	82,20	79,78	77,47	76,07	73,28	73,11	72,77	72,35

Tablica – 17. Podaci po kojima je izrađen dijagram na slici 25.

h/m|t/h	0	12	24	36	48	60	72	84	96
1,5	63,00	65,93	72,80	72,65	70,02	66,86	64,16	61,92	60,60
2,0	63,00	70,54	75,34	73,43	70,39	67,22	64,65	62,65	61,59
2,5	63,00	75,65	76,69	73,64	70,43	67,31	64,92	63,18	62,14
3,0	63,00	79,47	77,21	73,70	70,46	67,43	65,27	63,82	62,73
3,5	85,00	80,91	77,32	73,72	70,50	67,62	65,74	64,56	63,33
4,0	85,00	80,94	77,32	73,72	70,57	67,90	66,32	65,41	64,69
4,5	85,00	80,94	77,32	73,72	70,68	68,28	67,03	66,23	65,48
5,0	85,00	80,94	77,32	73,72	70,87	68,79	67,86	67,13	66,57
5,5	85,00	80,94	77,32	73,72	71,58	70,24	69,21	68,56	68,12

Tablica – 18. Podaci po kojima je izrađen dijagram na slici 26.

Povećanje debljine izolacijskog sloja, %									
-	50	100	-	50	100	-	50	100	
T1/°C	**T1/°C**	**T1/°C**	**T9/°C**	**T9/°C**	**T9/°C**	**T_avg/°C**	**T_avg/°C**	**T_avg/°C**	**t/h**
63,00	63,00	63,00	85,00	85,00	85,00	78,50	78,50	78,50	0
67,30	67,53	67,49	80,94	81,39	81,60	78,37	77,79	77,97	12
74,05	74,74	74,95	77,33	78,17	78,56	76,35	77,12	77,47	24
73,04	74,21	74,72	74,09	75,24	75,76	73,92	74,96	75,43	36
70,13	71,65	72,36	72,19	73,48	74,04	72,13	73,34	73,86	48
67,00	68,81	69,65	71,28	72,62	73,18	70,71	72,01	72,58	60
64,59	66,57	67,48	70,87	72,07	72,99	69,95	71,30	71,87	72
62,83	64,91	65,83	70,24	71,49	72,45	69,37	70,64	71,32	84
62,03	64,13	65,23	69,85	71,01	71,87	68,82	70,15	71,01	96

Tablica – 19. Podaci po kojima je izrađen dijagram na slici 27.

Povećanje debljine izolacijskog sloja, %									
-	50	100	-	50	100	-	50	100	
T1/°C	**T1/°C**	**T1/°C**	**T9/°C**	**T9/°C**	**T9/°C**	**T_avg/°C**	**T_avg/°C**	**T_avg/°C**	**t/h**
63,00	63,00	63,00	85,00	85,00	85,00	78,50	78,50	78,50	0
67,85	67,80	67,85	82,20	82,33	82,48	78,57	79,67	79,81	12
75,93	76,02	76,22	79,78	80,01	80,30	78,68	78,87	79,13	24
76,47	76,67	77,15	77,47	77,79	78,19	77,08	77,36	77,72	36
74,78	75,14	75,71	76,07	76,39	76,87	75,90	76,18	76,62	48
72,63	73,12	73,75	74,28	75,22	76,11	74,85	75,19	75,65	60
70,92	71,45	72,15	73,11	74,77	75,45	73,84	74,67	75,14	72
69,53	70,07	70,81	72,77	74,01	74,80	73,09	74,11	74,69	84
68,13	69,38	70,13	72,35	73,69	74,37	72,46	73,78	74,57	96

Tablica – 20. Podaci po kojima je izrađen dijagram na slici 28.

Povećanje debljine izolacijskog sloja, %									
-	50	100	-	50	100	-	50	100	
T1/°C	**T1/°C**	**T1/°C**	**T9/°C**	**T9/°C**	**T9/°C**	**T_avg/°C**	**T_avg/°C**	**T_avg/°C**	**t/h**
63,00	63,00	63,00	85,00	85,00	85,00	78,50	78,50	78,50	0
65,93	66,24	66,30	80,94	80,98	81,15	78,13	78,24	78,40	12
72,80	73,25	73,48	77,32	77,54	77,86	76,13	76,44	76,73	24
72,65	73,05	73,89	73,72	74,24	75,59	73,65	74,04	75,08	36
70,02	70,60	71,16	71,58	72,14	72,63	71,70	72,31	72,76	48
66,86	67,28	68,25	70,24	70,86	71,39	70,08	70,76	71,25	60
64,16	65,16	65,89	69,21	70,28	70,81	69,10	69,97	70,14	72
61,92	63,07	63,85	68,56	69,79	70,35	68,19	69,23	69,75	84
60,60	61,98	62,76	68,12	69,16	69,89	68,01	68,45	69,26	96