Analiza termodinamičkog procesa s realnim radnim tvarima

Vlašić, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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:149:661972

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-12**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Luka Vlašić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Luka Vlašić

ANALIZA TERMODINAMIČKOG PROCESA S REALNIM RADNIM TVARIMA

ANALYSIS OF A THERMODYNAMIC PROCESS WITH REAL WORKING MEDIA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Veljko Filipan

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof. dr. sc. Veljko Filipan

prof. dr. sc. Igor Sutlović

izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

Zagreb, rujan 2018.

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Veljku Filipanu na savjetima i pomoći tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem i gospodinu Josipu Pogačiću, višem tehničaru za kriogeniku na Institutu za fiziku, na savjetima, ustupljenim mjernim podacima te pomoći u izradi završnog rada.

SAŽETAK RADA

U radu se obrađuje proces ukapljivanja helija, točnije, prati se kružni proces ukapljivanja helija u Kochovom ukapljivaču koji se zapravo temelji na Collinsovom kružnom procesu. Koristeći eksperimentalne podatke iz Kochova ukapljivača , provode se daljnji proračuni vezani uz bilance tvari i energije, kao i određivanja ostalih značajki procesa (iskorištenje ekspandera, iscrpak itd.) pomoću računalnog programa REFPROP , baze termodinamičkih parametara za realne radne tvari.

Navedeni termodinamički proces prikazuje se u odgovarajućim termodinamičkim dijagramima kako bi se zorno predočio tijek samog procesa ukapljivanja te stanja fluida u procesu.

Ključne riječi :

termodinamički proces, termodinamički dijagrami, realne radne tvari, REFPROP, ukapljivanje, Collinsov kružni proces, Kochov ukapljivač

ABSTRACT

In this project work, the process of helium liquefaction is presented in Koch´s liquefier which is actually based on Collins cycle. By using experimental data from Koch´s liquefier, further calculations are made in terms of balance of matter and energy as in determining other process features (expander utilization, yield etc.) by the help of REFPROP, thermodynamic parameters database of real working media.

Thermodynamic process, mentioned above, is presented in corresponding thermodynamic diagrams so the liquefaction process would be easily shown and also that the state of fluid could be monitored.

Key words:

thermodynamic process, thermodynamic diagrams, real working media, REFPROP, liquefaction, Collins cycle, Koch´s liquefier

Tablica sadržaja

1 UVOD ... 1
2 TERMODINAMIČKI PROCES I OPREMA ZA UKAPLJIVANJE ... 2
2.1 Teorijski termodinamički proces ... 2
2.2 Prigušivanje ... 3
2.3 Collinsov proces ukapljivanja ... 6
2.4 Elementi uređaja za ukapljivanje ... 8
2.4.1 Kompresori i kompresija ... 8
2.4.2 Izmjenjivači topline ... 10
2.4.3 Ekspanderi i ekspanzija ... 14
3 REFPROP (REFerence fluid PROPerties) ... 15
4 EKSPERIMENTALNI DIO ... 18
5 REZULTATI PRORAČUNA I RASPRAVA ... 26
5.1 Proračun osnovnih veličina procesa ... 30
5.1.1 Usporedba procesa s idealnim adijabatskim (izentropskim) ekspanzijama i realnim ekspanzijama ... 32
5.2 Kompresori ... 34
5.3 Ekspanderi ... 35
5.3.1 Usporedba dobivenih ekspanzijskih radova u idealnom i realnom procesu ... 35
5.3.2 Stupnjevi iskorištenja ekspandera ... 35
5.3.3 Utrošena snaga i energija u procesu ... 37
6 ZAKLJUČAK ... 38
7 POPIS OZNAKA I INDEKSA ... 39
8 LITERATURA ... 42
9 ŽIVOTOPIS ... 43

1 UVOD

U radu je analiziran Collinsov proces za ukapljivanje helija koji je u suštini Claudeov proces uz dvostupanjsku ekspanziju (može biti i do 6 ekspanzija u sustavu).

Ukapljivanje je proces pri kojemu se temperatura plina snižava do vrijednosti niže od kritične, kada su kapljevita i parna faza u ravnoteži. Plinovi kojima je kritična temperatura niža od -100 °C , kao npr. vodik, helij, zrak, mogu se prevesti u kapljevito stanje primjenom kriogenih transformatora topline, koji rade na temperaturama koje su niže od 120 K [1].

Današnji procesi koji se primjenjuju za ukapljivanje plinova općenito se temelje na snižavanju tlaka i temperature prigušivanjem (Joule-Thomson efekt). Prigušivanje je nepovratni proces bez dovoda i odvoda topline te obavljanja vanjskog rada ; proces uz konstantnu entalpiju. Entalpija idealnog plina ne ovisi o tlaku, a to znači da idealni plin prilikom prigušivanja ne mijenja temperaturu. Kod realnih plinova temperatura se mijenja, a promjena je određena odstupanjem svojstava plina od idealnog , zbog međumolekularnih sila [2].

U uređajima za ukapljivanje može se prigušivati cijela masa radnog medija ili se može prigušivati jedan dio radnog medija dok se drugi dio ekspandira.

Do danas najrazvijeniji su sljedeći procesi ukapljivanja :
- visokotlačni proces s jednokratnim prigušivanjem ukupne mase radnog medija (Lindeov)
- srednjetlačni (Claudeov) i visokotlačni (Heylandtov) procesi s prigušivanjem jednog dijela i ekspanzijom u ekspanzijskom cilindru (detanderu) drugog dijela plina
- niskotlačni (Kapica) s turbokompresorom i turbodetanderom umjesto cilindra

→ osim navedenih procesa , za ukapljivanje plinova se koristi i Philipsov plinski uređaj (ljevokretni Stirlingov proces

Helij ima niže vrelište od bilo koje druge poznate tvari. Pod tlakom od 1,013 bara vrelište mu je na 4,2 K , a pod tim tlakom uopće se ne može prevesti u čvrsto stanje. Helij se vjerojatno nalazi u kapljevitom stanju sve do apsolutne nule. Komercijalno dobavljeni helij se sastoji uglavnom od izotopa He^4 , ali uz taj izotop nalazi se i izotop He^3, ali u izuzetno malom udjelu.

Još jedna zanimljivost o heliju je ta, da kada se ohladi do 2,18 K pri 1,013 bara (tzv. lambda točka), mijenja se u kapljevinu koja se naziva helij II. Helij II je jedna od najčudnijih poznatih tvari; toplinska vodljivost mu je 600 puta veća od toplinske vodljivosti bakra na sobnoj temperaturi. Viskoznost mu je oko 1000 puta manja od one plinovitog vodika, a ako se helij II stavi u posudu, kapljevina će se „ penjati “po unutrašnjoj strani, a spuštati po vanjskoj strani posude [3] .

Da je helij važan u svakodnevnom životu, potvrđuje i činjenica da se koristi u plinskoj smjesi u bocama za ronjenje (volumni udio 21% O_2 i 79% He) jer je helij inertan i manje se otapa u krvi od dušika te je manja opasnost od opasne zračne embolije, tj. začepljenja krvnih žila [3].

Upravo iz navedenog značaja u ispitivanju materije i svakodnevnom životu, ukapljivanje helija u današnje vrijeme postaje sve značajnije.

2 TERMODINAMIČKI PROCES I OPREMA ZA UKAPLJIVANJE

2.1 Teorijski termodinamički proces

Teorijski proces ukapljivanja bi se mogao provesti izotermnom kompresijom plina (1-2) te adijabatskom ekspanzijom (2-3), uz utrošak minimalnog rada koji je prikazan crtkanom površinom u kružnom procesu 1-2-3-4-1 (slika 1.) .

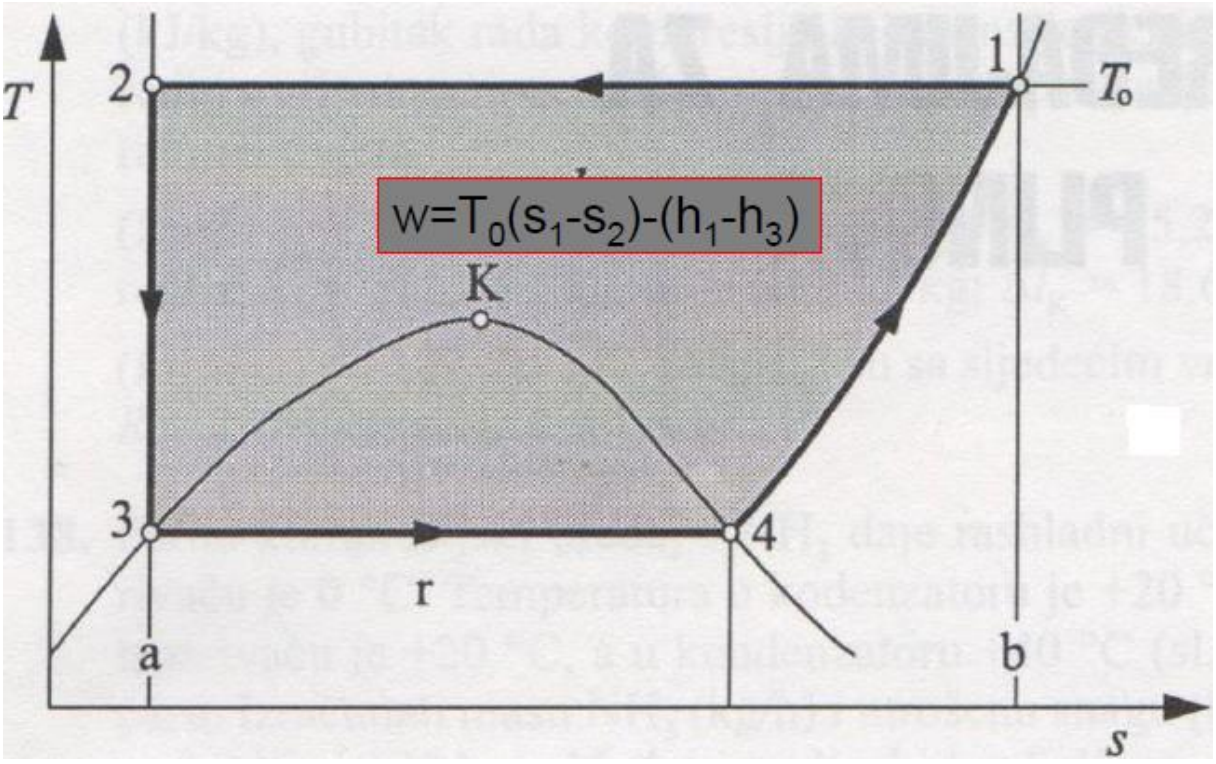
površina 1, 2, 3, 4 = površina 1, 2, a, b – površina 1, 4, 3, a, b (1)

Pritom je površina **1, 2, a, b =** $\boldsymbol{T_0\ (s_1 - s_2)}$, (2)

a površina **1, 4, 3, a, b** = **r +** $\int_4^1 c_p dt$ = $\boldsymbol{h_1 - h_3}$ (3)

→ iz toga slijedi da je utrošeni rad:

w = $\boldsymbol{T_0\ (s_1 - s_2)}$ **-** $\boldsymbol{(\ h_1 - h_3\ )}$ (4)



Slika 1. Teorijski proces ukapljivanja

Takav idealni proces nije ostvariv zbog vrlo visokih konačnih tlakova (stanje 2), koji su potrebni da bi se adijabatskom ekspanzijom plin preveo u kapljevito stanje (stanje 3).

Iz tog razloga se umjesto ekspanzije, današnji se procesi, kako je već prethodno navedeno, koriste Joule-Thomsonovim efektom sniženja temperature prigušivanjem.

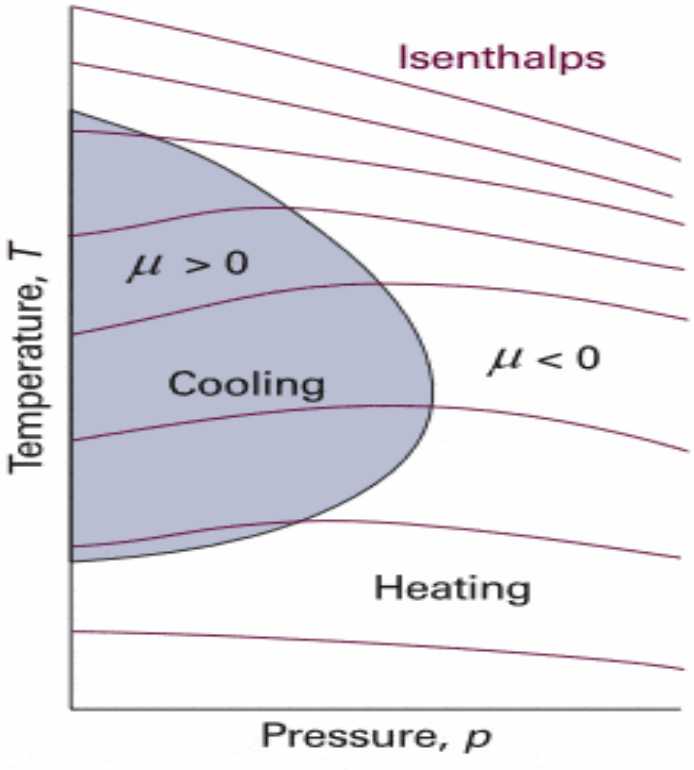
2.2 Prigušivanje

Joule – Thomsonova ekspanzija (metoda unutarnjeg rada). Plin se prvo komprimira na visoki tlak, a toplina, koja se pri kompresiji stvara, odvodi se rashladnim medijem. Plinu se tada snižava temperatura (npr. tekućim dušikom) do neke određene gdje se plin zatim ekspandira kroz mali otvor, npr. kroz djelomično otvoreni igličasti otvor (J-T ventil). Pri ekspanziji molekule se udaljuju jedne od drugih pri čemu moraju prevladati privlačne sile među njima. Energija, koja je za to potrebna, oduzima se od kinetičke energije molekula, pa se, kao posljedica, smanjuje unutarnja energija plina, a time se snižava i njegova temperatura.

Ta se metoda može primijeniti samo ako među molekulama plina djeluju privlačne sile . Ako među molekulama vladaju odbojne sile, što se događa kada je temperatura plina veća od tzv. inverzijske temperature , plin se prilikom ekspanzije ne hladi, već se zagrijava [4].

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \mu \qquad (5)$$

Diferencijalni koeficijent na lijevoj strani gore navedene jednadžbe naziva se Joule-Thomsonov koeficijent koji opisuje promjenu temperature plina pri adijabatskoj kompresiji ili ekspanziji. Kod idealnih plinova taj je koeficijent jednak nuli (prilikom ekspanzije idealni plin ne mijenja temperaturu).



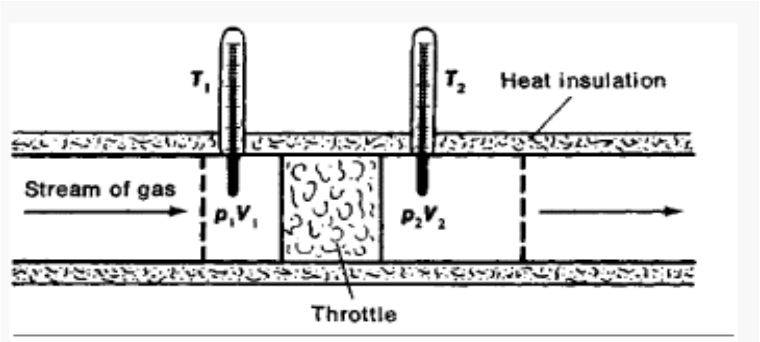
Slika 2. Izentalpska ekspanzija realnog plina (hlađenje – zatamnjeno područje ispod inverzijske krivulje) [5]

Za realne plinove, eksperimentom je utvrđeno da se plin pri nižim temperaturama pri ekspanziji hladi, a pri visokim zagrijava, što znači da je predznak Joule – Thomsonova koeficijenta različit od nule, tj. taj koeficijent je pozitivan pri niskim, a negativan pri visokim temperaturama. Pri konstantnom tlaku, temperatura pri kojoj dolazi do promjene predznaka Joule – Thomsonova koeficijenta naziva se inverzijska temperatura. Realni plinovi, osim spomenute gornje inverzijske temperature imaju još jednu, nižu (donju), koja u kemijskom inženjerstvu nema neke praktične važnosti [2] . Promjena unutrašnje energije (u prigušnici) se ostvaruje samo mehaničkim radom (nema izmjene topline s okolinom) pa slijedi :

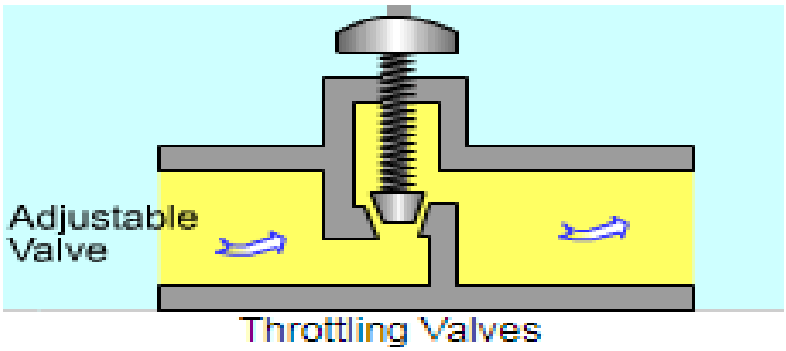
$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q + W = 0 + W_1 + W_2 = p_1V_1 - p_2V_2 \quad (6)$$

$U_1 + p_1V_1 = U_2 + p_2V_2$ ($H_1 = H_2$); tj. entalpija je stalna (slika 2.) (7)

Najčešće korišteni prigušni elementi:



Slika 3. Porozni čep (porozni sloj) [6]

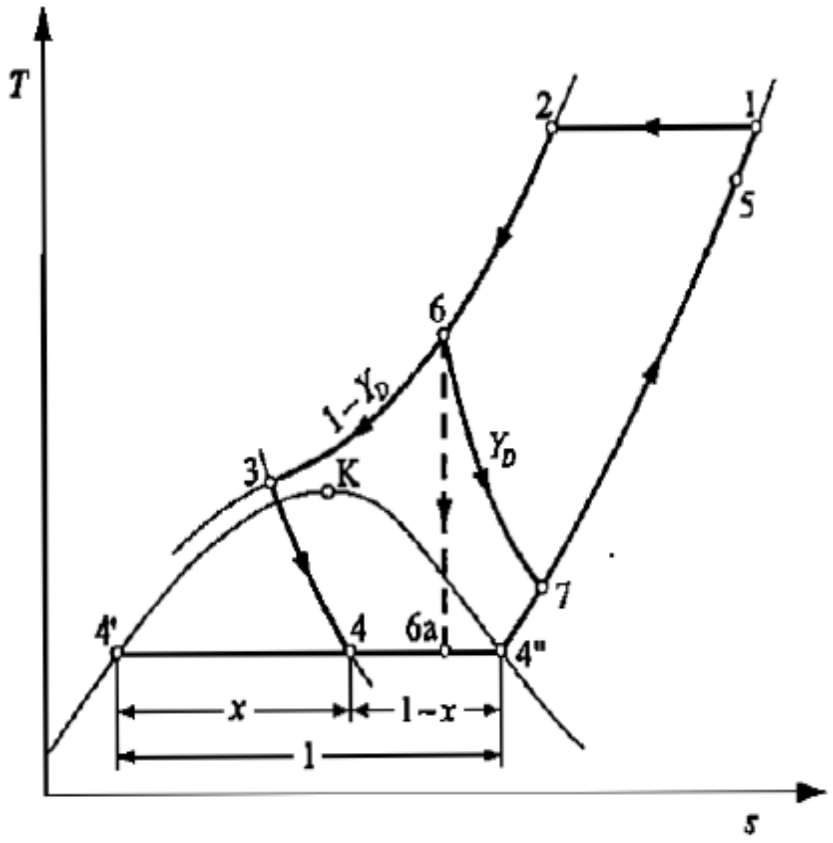


Slika 4. Prigušni ventil [7]

Slika 5. Kapilarna cijev [8]

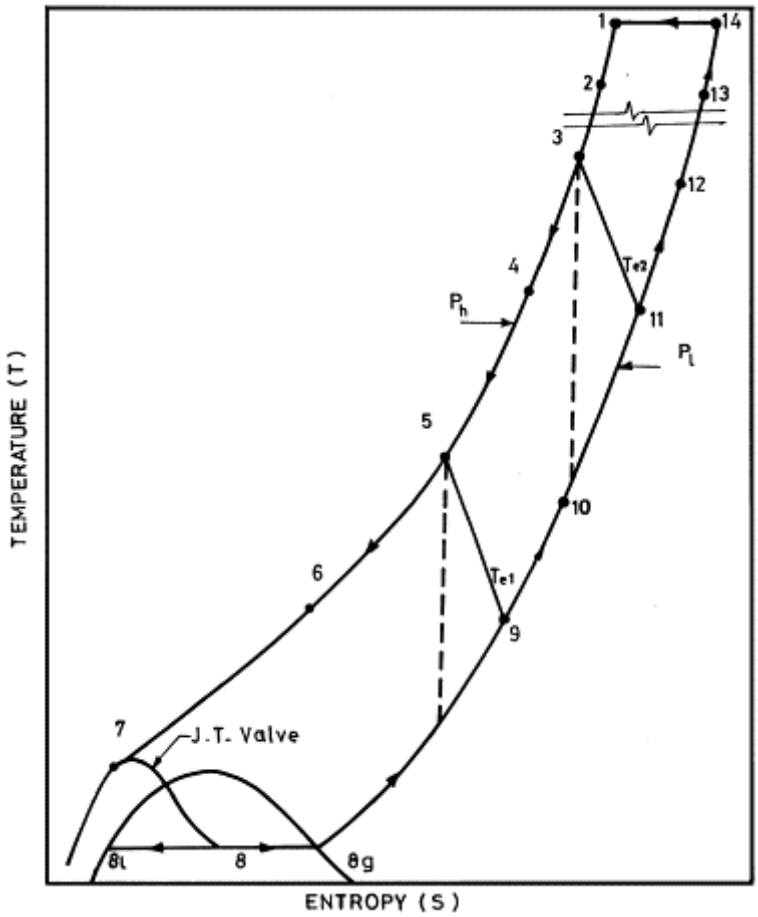
2.3 Collinsov proces ukapljivanja

Collinsov proces je u suštini, kako je prethodno već napometnuto, Claudeov proces (slika 6.) s dvije ekspanzije dijela radnog medija (slika 7.) . Kod ukapljivanja helija u Kochovu uređaju, helij se prvo kompimira s početnog tlaka 0,024 MPa na konačni tlak od 1,4 MPa. Zatim se pomoću tekućeg dušika temperatura snižava do pogodne temperature plinovitog helija na ulazu u prvi ekspander (T < 100 K). Odvedeni dio struje helija se odvodi u povratnu struju, dok se preostali dio plina odvodi do ulaza u drugi ekspander također jedan dio helija ekspandira te završava u povratnoj struji. Konačni ostatak helija dolazi do Joule - Thomsonova ventila gdje se, ovisno o temperaturi na tom ulazu, prigušuje ili otvara J-T ventil te se ostvaruje željena konačna temperatura i tlak u području dvofazne smjese.



Slika 6. Prikaz Claudeovog procesa (maksimalni tlak je 60 bara)

Porastom količine plina za hlađenje povećava se i konačni iscrpak. Ova količina odvojenog dijela helija je ograničena jer se njenim povećanjem može narušiti izmjena topline u rekuperatoru, zbog prolaska mnogo medija za hlađenje, a malo onog koji se hladi .



Slika 7. Usporedba idealnog (isprekidano) i realnog Collinsovog procesa [9]

Idealni kružni proces obuhvaća sljedeće pretpostavke :

- masa radnog medija se u procesu ne mijenja; nema gubitaka punjenja i istiskivanja helija
- radni medij se promatra kao idealni plin (zanemaruje se ovisnost specifičnih toplina o temperaturi)
- svi procesi su povratljivi; nema gubitaka

U realnom kružnom procesu stvarni rad kompresora je veći od idealnog, a ekspanzija nije adijabatska (izentropska). Koeficijent iskorištenja (η_K) izotermnog kompresora općenito iznosi oko 60 %. U detanderima je ekspanzija nepovratljiva, a to je uzrokovano gubicima zbog izmjene topline sa stijenkama, prigušivanja na ulaznom i izlaznom ventilu te pojave trenja i vrtloženja radne tvari. Navedeni gubici izražavaju se koeficijentom iskorištenja adijabatskog detandera η_D, koji iznosi 65 – 70 % (prema literaturi i do 75 %) [1] .

2.4 Elementi uređaja za ukapljivanje

Uređaj za ukapljivanje plinova (helija u konkretnom slučaju) se sastoji od: kompresora, izmjenjivača topline, ekspanzijskih cilindara (detandera) , Joule - Thomsonovog sustava (J-T izmjenjivač topline, unutarnji J-T ventil te unutarnji difuzor) [10].

2.4.1 Kompresori i kompresija

Ovisno o načinu komprimiranja, kompresori se mogu podijeliti u dvije grupe: klipni i rotacijski te centrifugalni i aksijalni.

U klipnim kompresorima usisani radni medij se sabija u cilindru klipom te se nakon postizanja traženog tlaka utiskuje u sabirnik ili mrežu visokog tlaka.

U rotacijskim kompresorima se, kao i u klipnim kompresorima, primjenjuje kvazistatično komprimiranje plinova.

Kompresija u centrifugalnim i aksijalnim kompresorima ima dinamičko značenje i odvija se u 2 stupnja:

- 1. stupanj : plin dobiva brzinu

- 2. stupanj : kinetička se energija toka pretvara u energiju tlaka

Bez obzira na razlike u konstrukciji i drugačiji način rada kompresora obiju grupa, procesi koji se odvijaju u njima su, s termodinamičkog stajališta, ekvivalentni.

Najčešće korišteni kompresori su klipni i rotacijski kompresori.

Najčešće su pogonjeni elektromotorima, dostupni su i u višestupanjskim izvedbama (kompresije). Klipni kompresori daju visoke performanse na niskim brojevima okretaja elektromotota što ih čini pouzdanima jer su samim time izdržljivi i dugotrajni. Cilindri kompresora su izrađeni od ljevanog željeza kao i konstrukcija cijelog kompresora čime se osigurala zaštita od istjecanja ulja iz kompresora. U radu klipnog kompresora motor preko stapajice ili klipnjače pokreće klip koji vrši pritisak na radnu tvar.

Slika 8. Klipni kompresor [11]

Rad rotacijskih kompresora se temelji na usisavanju plina koji se onda transportira između rotora i kućišta u kompresoru te se počne gibati prema drugoj strani rotora . Plin se počinje stlačivati rotorima koji rotiraju u suprotnim smjerovima. Kompresija završava kada se stlačeni plin nađe u slobodnom prostoru između rotora. Tada stlačeni plin izlazi iz kompresora.

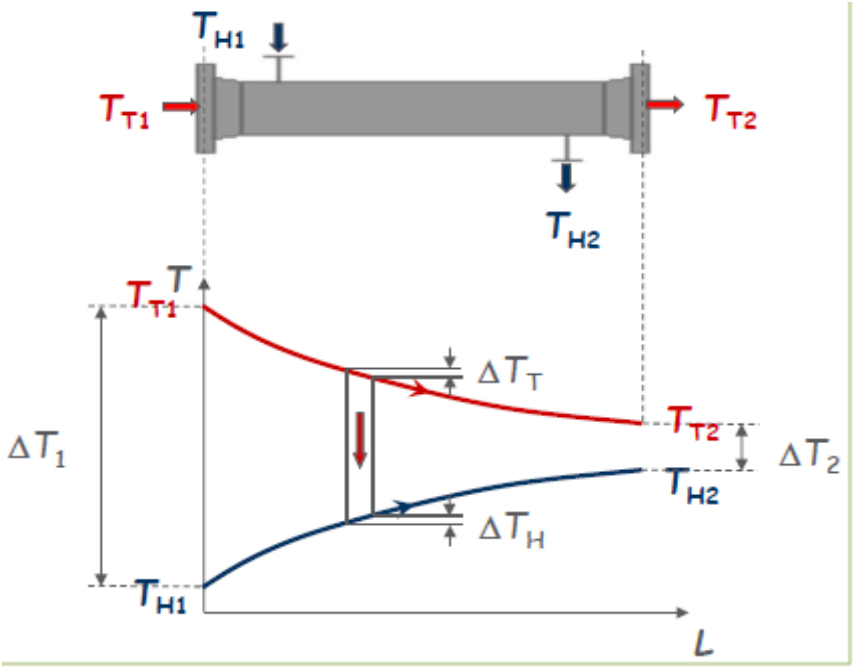
Slika 9. Rotacijski kompresor [12]

2.4.2 Izmjenjivači topline

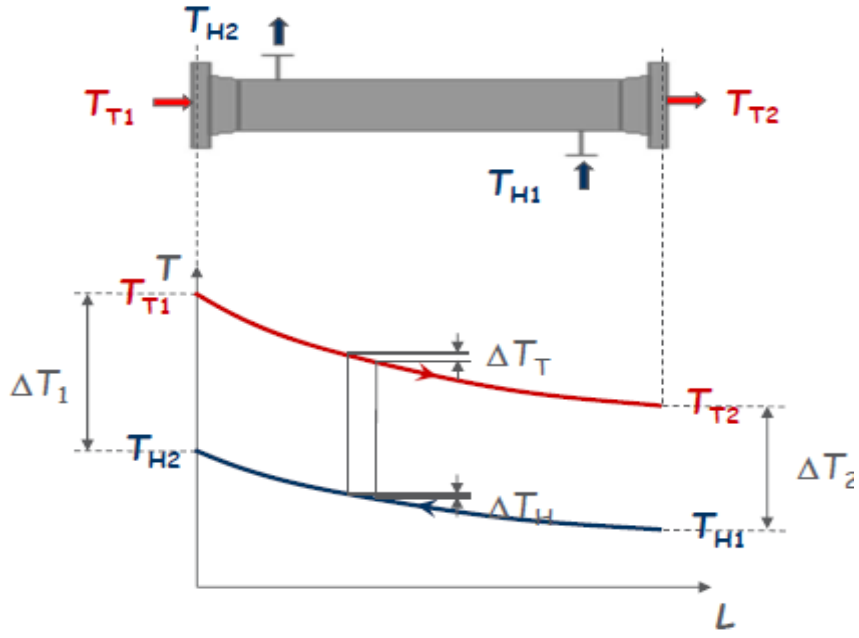
Izmjenjivači topline su uređaji u kojima se toplinska energija prenosi s jednog fluida na drugi bez međusobnog miješanja ta dva fluida. Primjena izmjenjivača topline je široka, kako u svakodnevnom životu tako i u industriji. Obzirom na široku primjenu postoji veliki broj različitih izmjenjivača topline, koji se onda mogu klasificirati na više načina. Klasifikacija se određuje obzirom na konstrukciju, smjer strujanja fluida, mehanizam prijenosa topline te način dovođenja fluida u kontakt.

Tri su osnovne konstrukcijske izvedbe izmjenjivača topline: cijevni, pločasti i spiralni. Obzirom na smjer strujanja fluida postoje: istostrujni, protustrujni i križni izmjenjivači topline.

Navedeni izmjenjivači se razlikuju po ostvarenoj lokalnoj pokretačkoj sili (temperaturnom gradijentu) koja se mijenja po duljini izmjenjivača. Kod istostrujnog izmjenjivača pokretačka sila je najveća na ulazu, a najmanja na izlazu oba fluida, dok je kod protustrujnog ta pokretačka sila gotovo konstantna duž cijevi [13].



Slika 10. Istostrujni izmjenjivač topline



Slika 11. Protustrujni izmjenjivač topline

Količina topline izmjenjena između toplog i hladnog fluida se može izračunati pomoću kinetičke jednadžbe:

$$\dot{Q} = \mathrm{K} \cdot A \cdot \Delta T_{LM} \qquad (8)$$

Srednja logaritamska razlika temperatura (pokretačka sila procesa) dana je slijedećim izrazom:

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2})} \qquad (9)$$

gdje su ΔT_1 *i* ΔT_2 razlike temperatura „toplog“ i „ hladnog „ fluida na jednoj i drugoj strani izmjenjivača.

U izmjenjivačima složene geometrije ostvaren je veći broj prolaza fluida kroz cijevi ili plašt te se pokretačka sila procesa mora korigirati faktorom F koji se određuje iz poznatih temperatura fluida ili se određuje pomoću funkcijskih ovisnosti određenih parametara o ostvarenim razlikama temperatura u cijevi i plaštu.

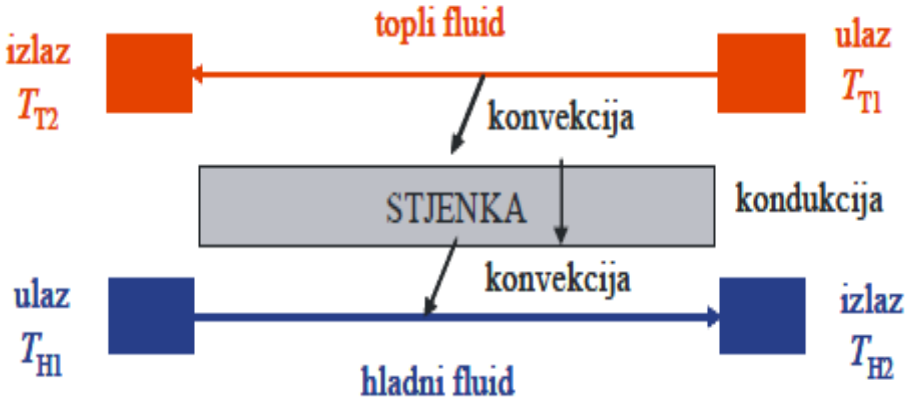
$$\dot{Q} = \mathrm{K} \cdot A \cdot \Delta T_{LM} \cdot F \qquad (10)$$

Recipročna vrijednost sume svih otpora odgovara ukupnom koeficijentu prolaza topline :

$$K = \frac{1}{\sum_i R_i} = \frac{1}{\sum_j R_{j,konvekcija} + \sum_k R_{k,kondukcija}} \qquad (11)$$

Ukupni koeficijent prolaza se određuje iz ovog izraza koji je objašnjen i priloženom slikom:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \qquad (12)$$

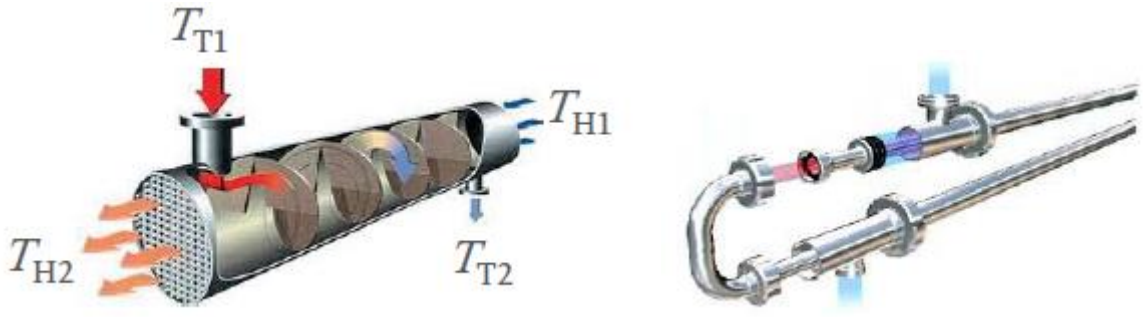


Slika 12. Izmjena topline između dva fluida preko stijenke

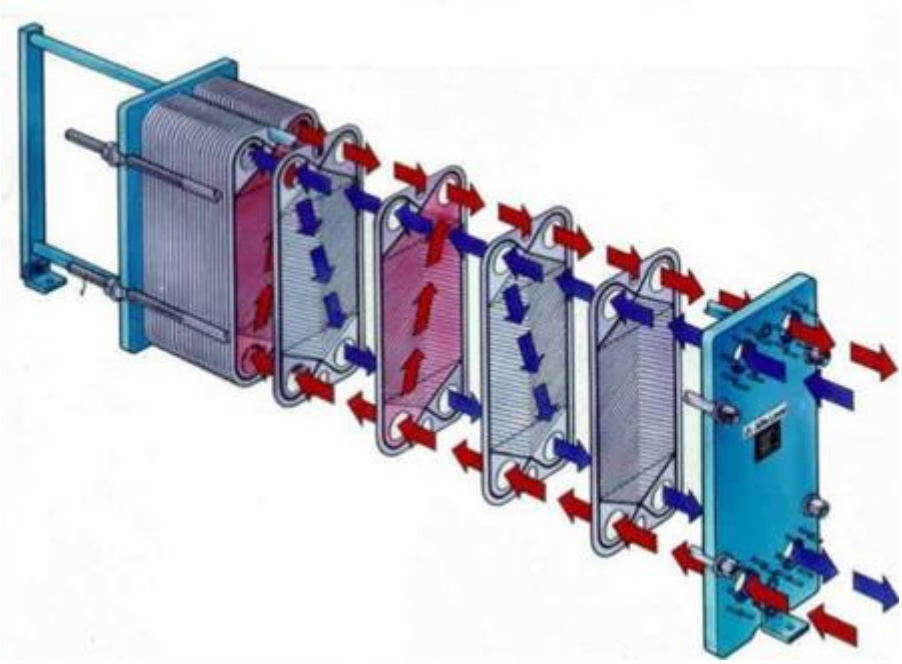
Ako na stijenci dođe da stvaranja naslaga (mulj, hrđa, taloženje organskih tvari), u jednadžbu za ukupni koeficijent prolaza topline mora se uvesti Foulingov faktor, R_f .

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\lambda}{l} + \frac{1}{\alpha_2} + R_f} \qquad (13)$$

U praksi se često koriste cijevni izmjenjivači topline, ali odličnim su se pokazali i pločasti izmjenjivači topline koji za istu količinu izmijenjene topline manje prostora no prikladni su samo za čiste fluide.



Slika 13. Cijevni izmjenjivači topline : snop cijevi u plaštu (lijevo) i cijev u cijevi (desno)



Slika 14. Pločasti izmjenjivač topline

2.4.3 Ekspanderi i ekspanzija

Ekspanzijski strojevi, odnosno detanderi, su strojevi koji služe za dobivanje rada i postizanje niskih temperatura. Kod ukapljivanja, detanderi služe kako bi se u njima odvila ekspanzija plina prilikom koje se plinu snižava temperatura. Prilikom ekspanzije može se i ekspandirati samo dio plina koji će se onda koristi za hlađenje dolazne struje plina (Collins).

3 REFPROP (REFerence fluid PROPerties)

Refprop je program koji koristi jednadžbe za termodinamička i prijenosna svojstva u svrhu izračunavanja veličina stanja određenog fluida ili smjese. Jednadžbe koje se koriste u programu su najtočnije jednadžbe koje se trenutno koriste u cijelom svijetu. Preciznost jednadžbi je očuvana za široko područje koeficijenata u jednadžbama te će zbog toga proračun ipak biti sporiji u odnosu na neke druge jednadžbe, npr. Peng-Robinsonovu kubnu jednadžbu. Jednadžbe su općenito valjane kako za kapljevitu, tako i za plinovitu fazu fluida, uključujući i nadkritična stanja fluida [14].

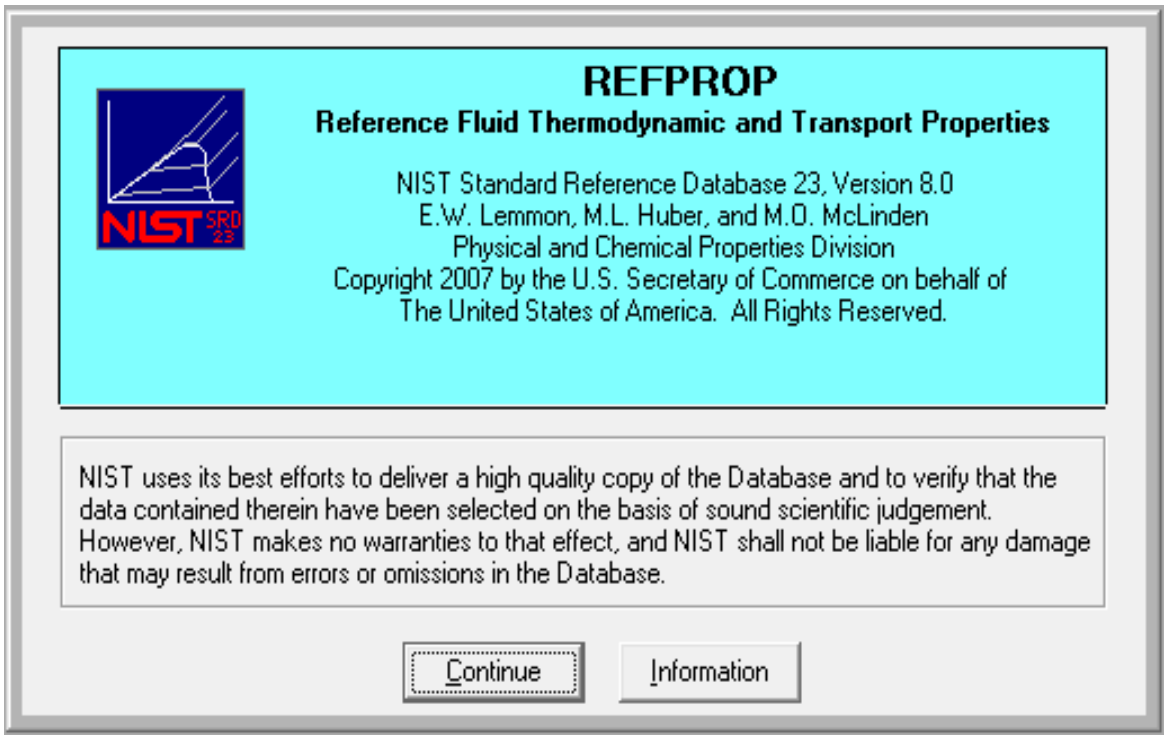
Jednadžbe u Refpropu (NIST) se baziraju na tri osnovna modela:

- modificirana Benedict-Webb-Rubinova (MWBR) jednadžba

- Helmholtzova energijska jednadžba stanja

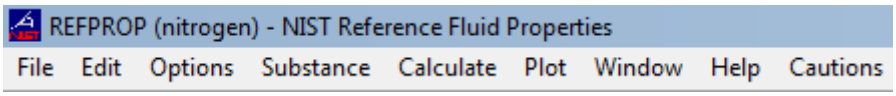
- prošireni model korespondentnih stanja (ECS)

Prilikom otvaranja instaliranog programa dvostrukim klikom na ikonu programa otvara se prikazano sučelje na slici 15. :

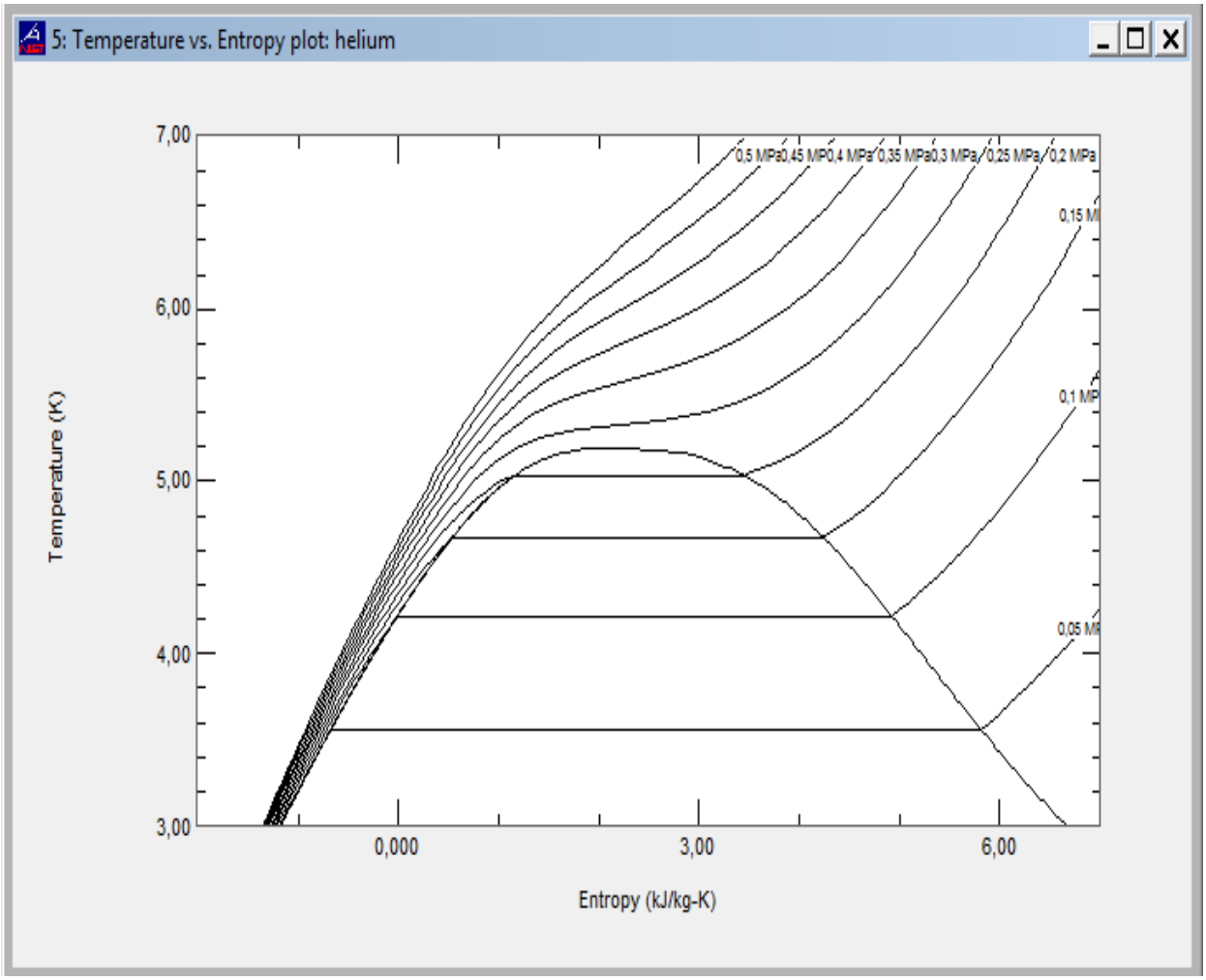


Slika 15. Sučelje programa REFPROP 8.0

Jednostavnim klikom na „ Continue“ otvara se program sa sljedećim mogućnostima :



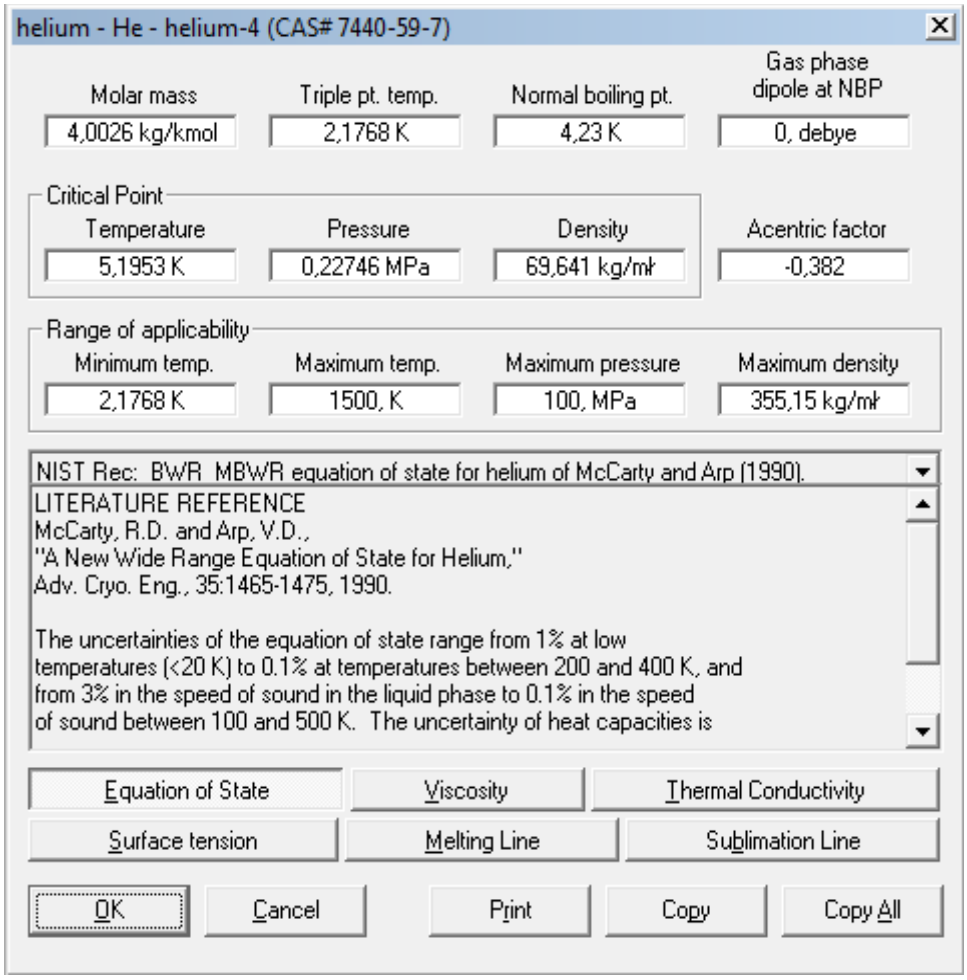
Otvaraju se mogućnosti za odabir željenog fluida ili smjese, određivanja veličina stanja i parametara fluida pri određenim uvjetima, npr. temperature i tlaka kao i mogućnosti za crtanje grafova pomoću naredbe „PLOT“.



Slika 16. T-s dijagram helija uz linije stalnog tlaka

Za svaki fluid ili smjesu u programu moguće je na jednostavan način doći do informacija o molarnoj masi fluida, o kritičnom tlaku, temperaturi i gustoći, faktoru acentričnosti, viskoznosti, površinskoj napetosti, toplinskoj vodljivosti i mnogih drugih.

Tražena svojstva mogu se pronaći na sljedeći način:



Slika 17. Svojstva helija

Neke od pogodnosti koje program REFPROP nudi su i te da se program može povezati i s nekim drugim programima kao što su npr. MATLAB i EXCEL.

Sljedećom naredbom u programu Excel se može doći do podatka o gustoći vode pri zadanom tlaku [MPa] i temperaturi [K].

=Density("water","TP","SI",300,1)

Naravno, analognim naredbama se određuju i željene entalpije, entropije i druge veličine za prethodno navedene uvjete, a jedinice veličina se mogu namještati po želji.

4 EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni ukapljivač helija nalazi se na adresi Bijenička cesta 46, 10 000 Zagreb, na Institutu za fiziku.

Suvremeni znanstveni i istraživački centri, baš kao i Institut za fiziku, koji se posebice bave područjem kemije, fizike, farmaceutskim istraživanjima , danas se ne mogu zamisliti bez postrojenja za ostvarivanje niskih temperatura. Neke od najvažnijih primjena su istraživanje fenomena i svojstava materijala na niskim temperaturama ili zbog potrebe za jakim i homogenim magnetskim poljim dobivenim supravodljivim zavojnicama. Tekući helij ostaje iz mnogih razloga temelj za niskotemperaturna istraživanja, pogotovo za institucije koje imaju privilegij postojanja već ranije izgrađenog sustava za ukapljivanj/recikliranje helija. Lociranje takvog sustava unutar ili u fizičkoj blizini istraživačkog centra uvjetovano je nizom razloga praktične i financijske prirode. Stoga je sustav za ukapljivanje helija danas nezaobilazni infrastrukturni element svakog većeg istraživačkog centra, pogotovo u području istraživanja fizike kondenzirane tvari. Prisustvo (ili izostanak) sustava za ukapljivanje helija je na taj način i svojevrsna mjera znanstveno-tehnološke razvijenosti i kompetitivnosti centra i sredine u kojoj se on nalazi [15].

Slika 18. Stari Collinsov ukapljivač (u uporabi od 1967. – 1989.)

Na slici 18. prikazan je stari ukapljivač helija koji više nije u funkciji zbog dotrajalosti te manjeg iscrpka helija u odnosu na novi Kochov ukapljivač (slike 19. – 25.).

U novom eksperimentalnom Kochovom ukapljivaču helija koji se obrađuje u ovom radu, koriste se klipni kompresori (slika 20.) sljedećih karakteristika:

„Model 1410 Compressor“

- klipni kompresor s dva stupnja kompresije
- trofazni pogonski elektromotor snage 21 kW
- pogonski elektromotor radi na 380 V i 50 Hz
- potrošnja rashladne vode iznosi 20 L/min
- kapacitet ukapljivanja s jednim takvim kompresorom iznosi 5 L/h helija
- paralelnim spajanjem drugog kompresora kapacitet se povećava na 10 L/h, a s 3 spojena kompresora kapacitet iznosi 15 L/h

U eksperimentalnom dijelu te matematičkom proračunu obrađuje se proces u kojemu rade dva kompresora (dobiveni volumni protok kapljevitog helija je 10 L/h).

Osim klipnih kompresora, Kochov uređaj se sastoji i od 5 glavnih izmjenjivača topline (slika 24.), prethlađivača (za prethlađivanje helija tekućim dušikom nakon kompresije – slika 23.), 2 ekspandera u kojima dolazi do ekspanzije određenih udjela ukupne mase helija, Joule – Thomsonova ventila za prigušivanje dijela radne tvari (slika 24.) te dijelova za pročišćavanje helija (adsorberi).

Na kraju procesa prilikom ukapljivanja dijela helija, ukapljeni helij ostaje u boci za ukapljivanje, dok se preostali dio helija koji se nije ukapljio nakon prigušivanja odvodi natrag povratnom strujom do kompresora.

Kada se skupi određena količina ukapljenog helija koji je spreman za daljnji transport, on se prebacuje u drugu bocu opremljenu za prijenos helija. Boca za transport je također napravljena od nehrđajućeg čelika, a u sebi sadrži okrugli dio za skupljanje kapljevitog helija koji je izoliran superizolacijom. U ovoj boci se tlak održava na što je moguće manjoj vrijednosti (vakuum).

Obje boce za skupljanje kapljevitog helija su prikazane na slici 25.

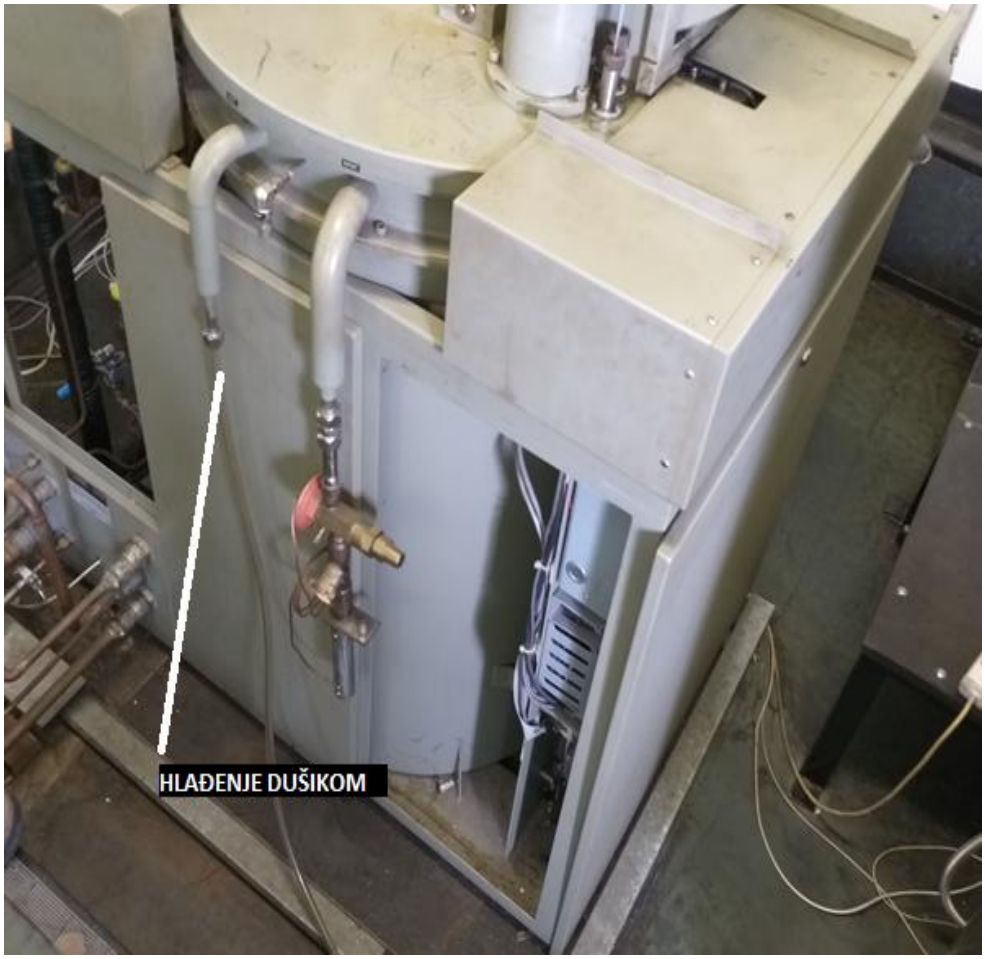
Slika 19. Novi ukapljivač tvrtke Koch Process Systems, Inc.-USA

Slika 20. Klipni kompresori (zvučna izolacija – iza)

Slika 21. Boce s plinovitim helijem

Slika 22. Održavanje minimalnog tlaka odvođenjem helija u povratnu struju (lijevo) i spremište helija koji ulazi u kompresore (desno)

Helij se po izlasku iz kompresora hladi tekućim dušikom na temperaturu oko 100 K ili manju, koji se dovodi u izmjenjivač topline kako je prikazano slikom ispod:



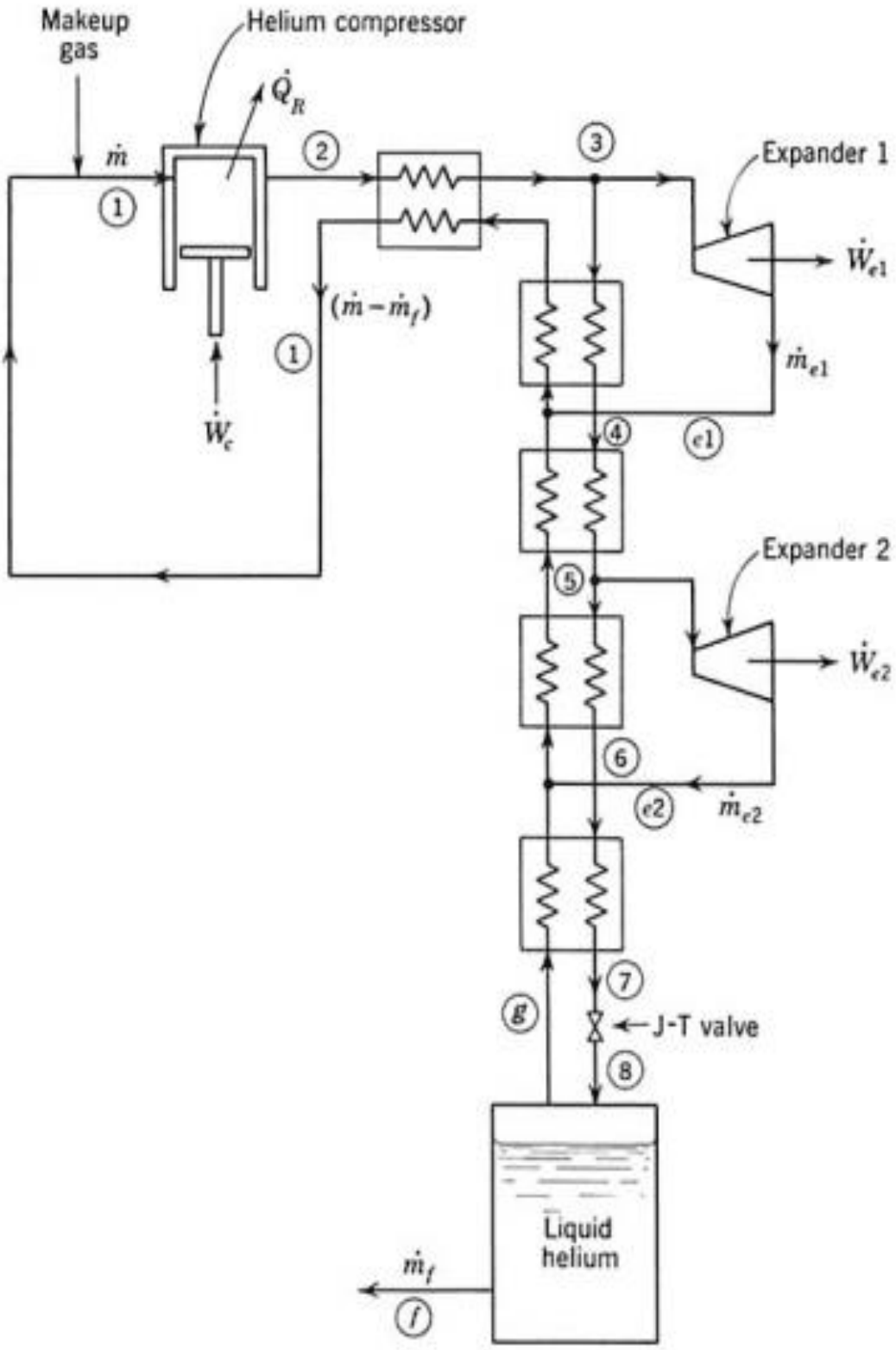
Slika 23. Dovod tekućeg dušika u izmjenjivač topline

U tzv. „hladnom dijelu“ („Cold box“) ukapljivača nalaze se svi izmjenjivači topline kao i Joule-Thomsonov ventil (igličasti) te upravljačka ploča na kojoj se prate i ,po potrebi, mijenjaju vrijednosti temperature i tlakova u sustavu.

Na sljedećoj slici prikazani su i vidljivi dijelovi „Cold boxa“.

Slika 24. „Cold box“

Slika 25. Boce za helij (nehrđajući čelik + superizolacija)



Slika 26. Shema Kochova ukapljivača helija (Collinsov proces)

Prema shemi uređaja na slici 26. proces se odvija tako da najprije kompresor dobavlja plinoviti helij te ga, ulažući određeni rad, komprimira na određeni maksimalni tlak (slika 20). Prilikom kompresije helija oslobađa se toplina koja se odvodi pomoću rashladnog medija (u ovom slučaju rashladni medij je voda). Nakon kompresije ukupna masa helija se izobarno hladi te se, na ulazu u prvi ekspander, odvaja dio radne tvari koji ekspandira u ekspanderu. Ostatak radne tvari se dalje hladi te opet dolazi do ekspandera gdje se odvaja još jedan dio radne tvari koji ekspandira i vraća se u povratnu struju dajući rad na identičan način kao i pri prvoj ekspanziji. Konačni ostatak ukupne mase helija dolazi na ulaz u Joule – Thomsonov ventil (slika 24.) gdje se njegovim prigušivanjem ili dodatnim otvaranjem osigurava željena konačna temperatura i tlak u sustavu. Na kraju se u boci za ukapljivanje skuplja ukapljeni helij (slika 25.), dok se ostatak plinovitog helija vraća natrag u povratnu struju helija koja, tim protustrujnim tokom izlaznog plina niskog tlaka, hladi struju stlačenog plina u izmjenjivačima topline (slika 24.).

5 REZULTATI PRORAČUNA I RASPRAVA

Korištenjem eksperimentalnih podataka najprije su određene su veličine stanja u točkama procesa potrebne za cjelokupni proračun i analizu procesa.

Nadalje, na temelju veličina stanja (dobivenih pomoću programa REFPROP i Excel) određuju se sljedeće veličine procesa :

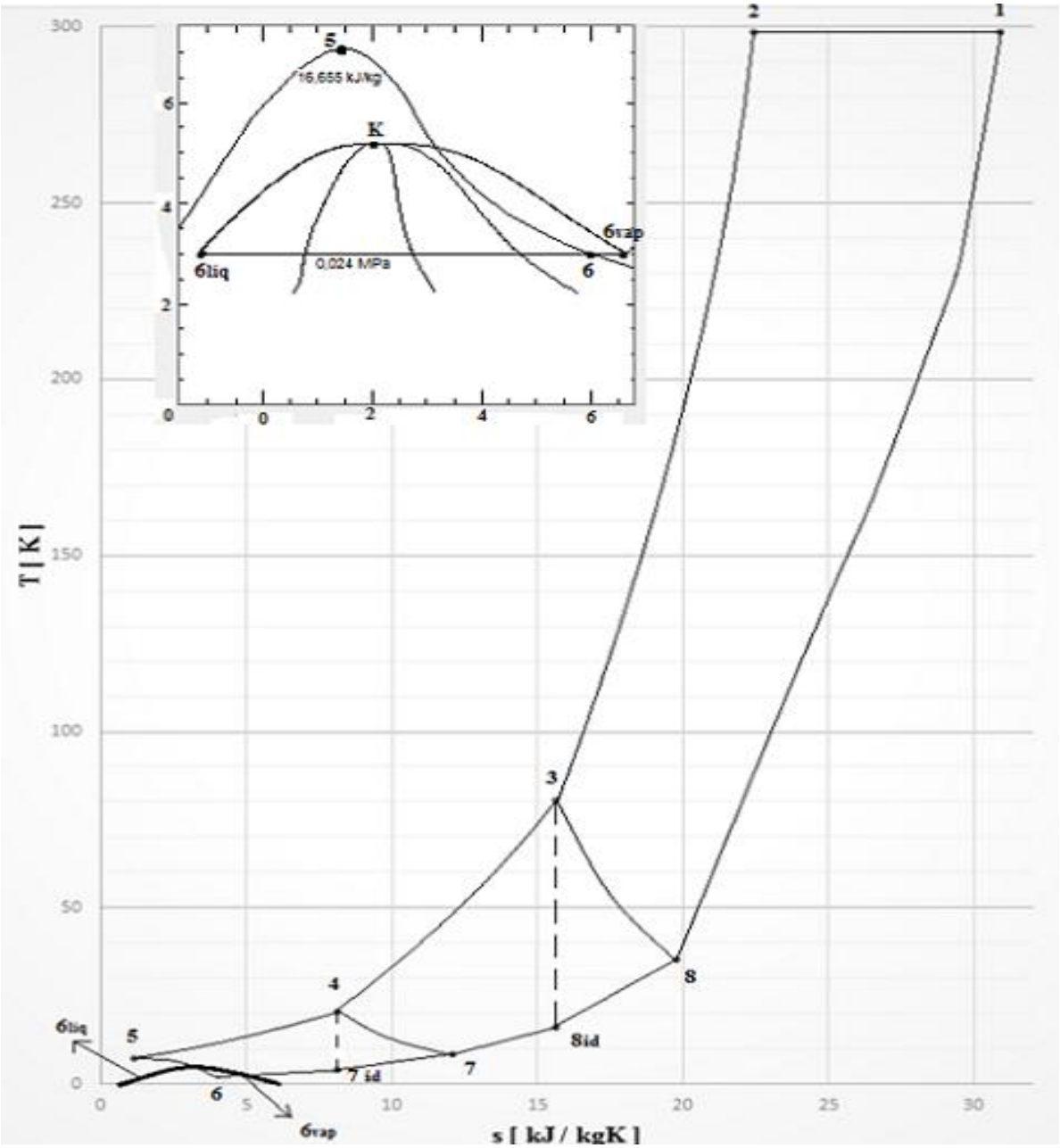
- iscrpak tekućeg helija
- masa ukapljenog zraka
- jedinični rad : stvarni rad kompresije – stvarni rad ekspazije
- utrošena snaga
- jedinična utrošena energija u kWh/kg
- udio radne tvari (helija) koji se ekspandira → idealni proces
- udio radne tvari (helija) koji se ekspandira → realni proces
- udio pare u dvofaznom području (kapljevina – plin)
- iskorištenje kompresora (uz pretpostavku izotermne kompresije)
- iskorištenja ekspandera

U nastavku se na temelju veličina stanja dobivenih iz eksperimentalnih vrijednosti tlakova i temperatura (TABLICA 1.) provodi proračun realnog procesa te se isti prikazuje na prikladnim dijagramima.

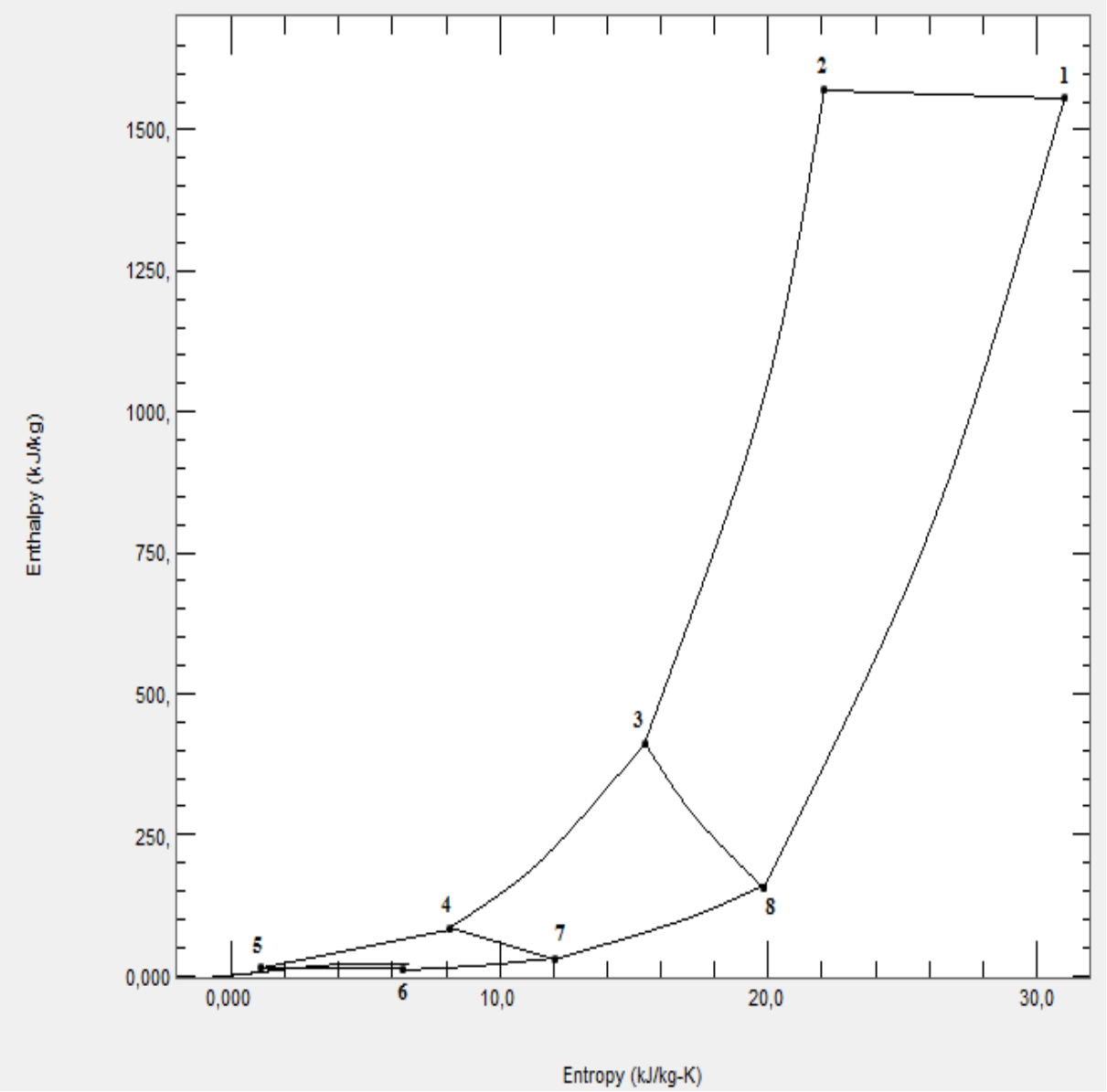
TABLICA 1. Veličine stanja helija u procesu dobivene programima REFPROP i Excel

Točka procesa	p [MPa]	T [K]	h [kJ/kg]	v [m^3/kg]	u [kJ/kg]	s [kJ/kgK]
1	0,024	298,00	1552,823	25,795	933,740	30,956
2	1,400	298,00	1557,270	0,445	934,260	22,512
3	1,400	80,00	424,143	0,122	253,820	15,672
4	1,400	20,00	102,466	0,030	60,588	8,151
5	1,400	7,00	16,655	0,008	5,806	1,171
6_{liq}	0,024	3,01	-4,841	0,007	-5,011	-1,168
6_{vap}	0,024	3,01	18,689	0,223	13,319	6,649
7_{id}	0,024	3,84	23,749	0,307	16,371	8,151
7	0,024	8,00	46,219	0,684	29,804	12,128
8_{id}	0,024	15,74	86,746	1,361	54,090	15,672
8	0,024	35,00	186,950	3,031	114,21	19,832

Analiziran je proces u kojemu rade 2 paralelno spojena klipna kompresora. Točke realnog procesa ukapljivanja dane su u prethodno prikazanoj Tablici 1. Ukupni maseni protok helija koji ulazi u proces je 9,2 g/s (33,12 kg/h). Volumni protok kapljevitog helija koji izlazi iz procesa je 10 L/h. Minimalni tlak u sustavu je 0,024 MPa dok je maksimalni tlak u sustavu 1,400 MPa. Kritični tlak i temperatura helija su : p_{crit} = 0,22746 MPa; T_{crit} = 5,1953 K .

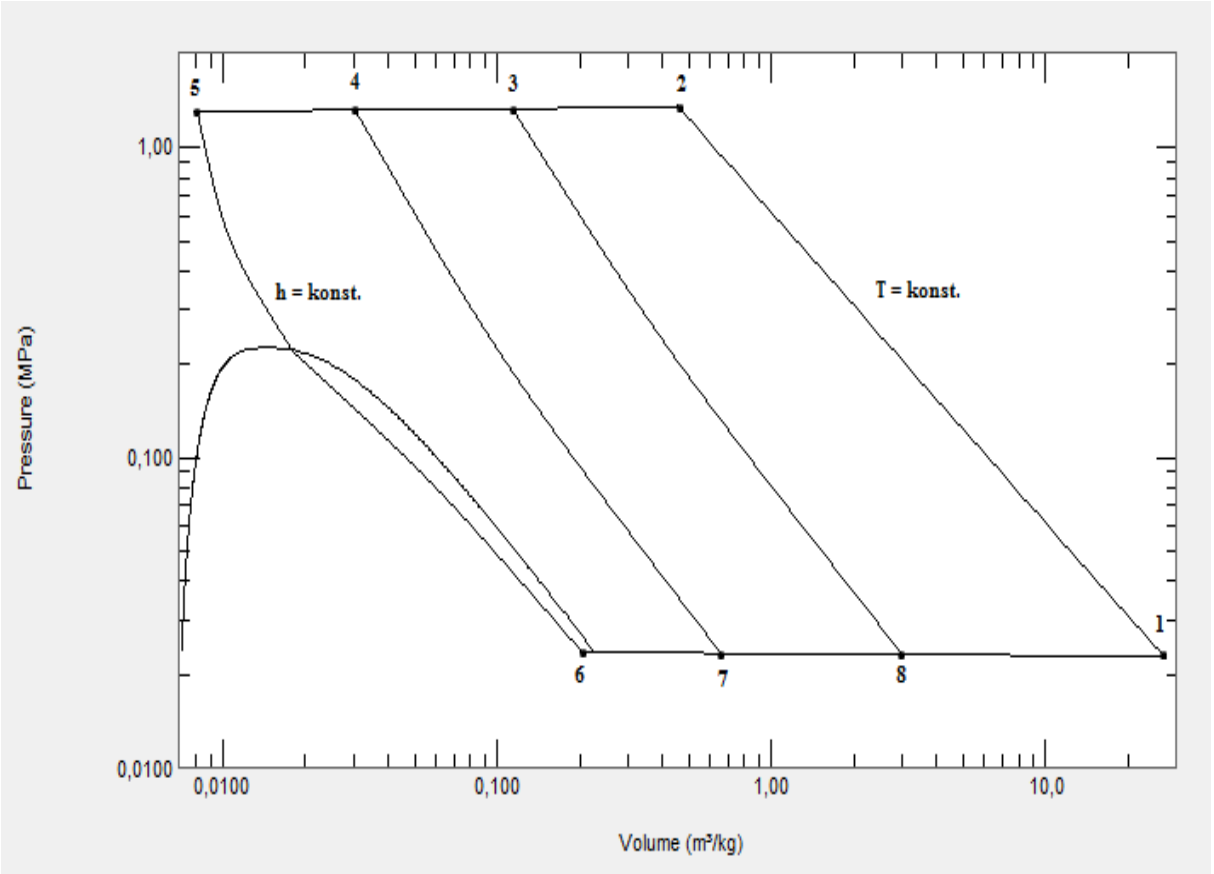


Slika 27. Prikaz procesa u T – s dijagramu (uvećano područje binodalne krivulje)



Slika 28. Realni proces ukapljivanja helija u h,s dijagramu

(linija 5 – 6 prikazuje područje konstantne entalpije; slabija preglednost zbog izrazito malog područja binodalne krivulje kod helija)



Slika 29. Realni proces ukapljivanja helija u p,v dijagramu

5.1 Proračun osnovnih veličina procesa

Iz sljedećih podataka moguće je izračunati masu ukapljenog helija, iscrpak te ravnotežni udio pare i kapljevine u području ispod binodalne krivulje te na temelju tih podataka izračunati prethodno navedene stavke u procesu

$V_{liq\ He}$ = 10 L/h

$\rho_{liq\ He}$ [T = 3,01 K , p = 0,024 MPa] = 0,1413 kg/L

Iz toga slijedi da je masa ukapljenog helija jednaka:

$$m_{liq\ He} = \rho_{liq\ He} \cdot V_{liq\ He} = 0{,}1413\ kg/L \cdot 10\ L/h = 1{,}413\ kg/h \quad (14)$$

Iscrpak kapljevitog helija iznosi :

$$y = \frac{m_{liq\ He}}{m_{uk}} = \frac{1{,}413\ kg/h}{33{,}12\ kg/h} = 0{,}043 \quad (15)$$

Iz uvjeta konstantne entalpije $h_5 = h_6$ = 16,655 kJ/kg te ravnotežnog tlaka od 0,024 MPa dobiva se udio parne i kapljevite faze na temelju kojih se vrše daljnji proračuni :

Sjecište navedene entalpije i tlaka (Excel proračun) → x = 0,914 (udio parne faze)

1-x = 0,086 (udio kapljevite faze)

Određuje se i ukupna masa helija u ravnoteži :

$$m_{eq\ He} = \frac{m_{liq\ He}}{1-x} = \frac{1{,}413\ kg/h}{0{,}086} = 16{,}43\ kg/h \quad (16)$$

Preostali udio od ukupne količine helija nakon dviju ekspanzija (u ravnoteži) :

$$\frac{m_{eq\ He}}{m_{uk}} = \frac{16{,}43\ kg/h}{33{,}12\ kg/h} = 0{,}496 \quad (17)$$

Iz ovog uvjeta mogu se postaviti jednadžbe pomoću kojih će se određivati udjeli odvojenih dijelova helija koji ekspandiraju u dvama ekspanderima :

X_1 – udio helija koji ekspandira u prvom ekspanderu (točke procesa od 3 – 8)

X_2 - udio helija koji ekspandira u drugom ekspanderu (točke procesa od 4 – 7)

$1 - X_1 - X_2 = 0{,}496$ (18)

$X_1 + X_2 = 0{,}504$

$$X_2 = 0{,}504 - X_1$$

Ovakva bilancna jednadžba se može dobiti i preko izraza za iscrpak :

$y = (1 – x) (1 - X_1 - X_2)$ (19)

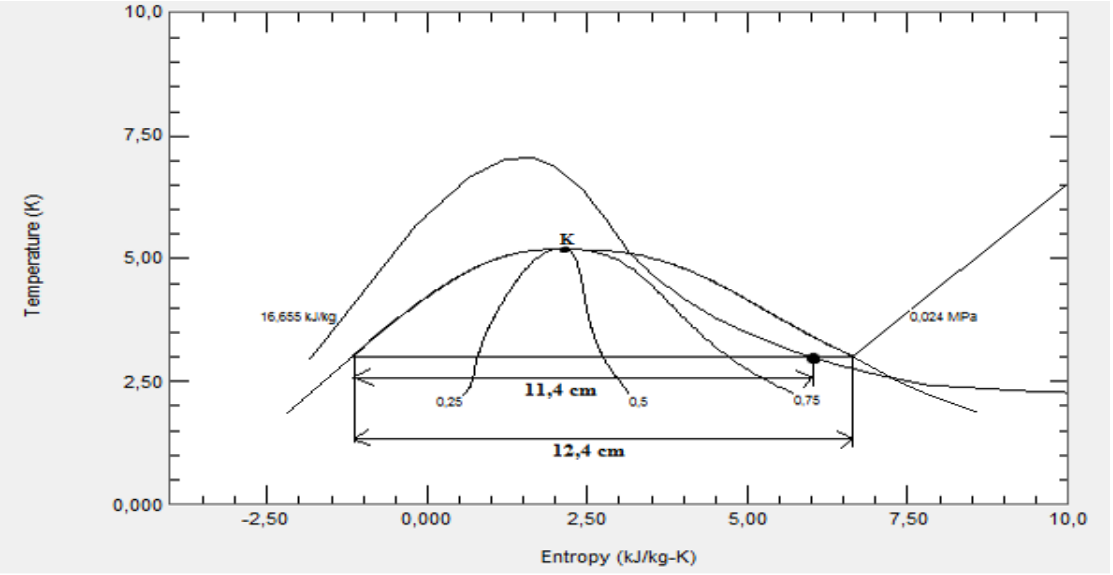
$$1 - X_1 - X_2 = \frac{0{,}043}{0{,}086}$$

$X_1 + X_2 = 0{,}500$

Kao što se vidi u izrazu (19), dobije se približno identičan rezultat zbog zaokruživanja prethodnih brojki, no u daljnjim proračunima će se koristiti iznad uokvireni izraz (18).

NAPOMENA : udio kapljevite i parne faze u ravnoteži može se osim, kako je napravljeno u ovom konkretnom slučaju, pronaći korištenjem programa REFPROP i Excel preko zadanih veličina stanja ili se može također pronaći korištenjem samog T – s dijagrama za helij gdje se pomoću „pravila poluge“ može izračunati traženi udio (iako je u tom slučaju točnost manja).

Pravilo poluge prikazano je na sljedećoj slici.



Slika 30. Grafičko određivanje udjela kapljevine i pare pravilom poluge

Ove prikazane duljine na slici iznad dobivene su u programu REFPROP uz sljedeća ograničenja:

- entropija : interval od -4 do 10 kJ/kgK
- temperatura : interval od 0 do 10 K
- entalpija kod prigušivanja : $h_5 = h_6$ = 16,655 kJ/kg
- tlak 0,024 MPa

Udio pare se tada računa koristeći se zadanim duljinama sa slike 24. :

x = $\frac{11{,}4\ cm}{12{,}4\ cm}$ = 0,911 ; slijedi da je udio kapljevite faze : 1 – x = 0,089

Vidi se manje odstupanje od rezultata dobivenog pomoću Excel programa (x = 0,914).

Izračunavanjem udjela kapljevine i pare te izraza (18) može se odrediti masa helija koja se odvojila u oba ekspandera.

5.1.1 Usporedba procesa s idealnim adijabatskim (izentropskim) ekspanzijama i realnim ekspanzijama

<u>Idealne adijabatske ekspanzije</u> :

Osim izraza (15) za iscrpak vrijedi i sljedeća jednadžba :

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{6\,liq}} + \frac{h_3 - h_{8\,id}}{h_1 - h_{6\,liq}} X_1 + \frac{h_4 - h_{7\,id}}{h_1 - h_{6\,liq}} X_2 \qquad (20)$$

$$0{,}043 = \frac{1552{,}823 - 1557{,}270}{1552{,}823 - (-4{,}841)} + \frac{424{,}143 - 86{,}746}{1552{,}823 - (-4{,}841)} X_1 + \frac{102{,}466 - 23{,}749}{1552{,}823 - (-4{,}841)} X_2$$

0,043 = - 2,855 · 10^{-3} + 0,217 X_1 + 0,051 X_2 , uz uvjet iz (18)

0,046 = 0,217 X_1 + 0,051 (0,504 - X_1)

Kada se ova linearna jednadžba do kraja riješi dobivaju se ova rješenja :

X_1 = 0,122 (12,2 %)

X_2 = 0,382 (38,2 %)

Realne ekspanzije :

Analogno korištenjem izraza (20) postavlja se jednadžba :

$$y = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{6\,liq}} + \frac{h_3 - h_8}{h_1 - h_{6\,liq}} X_1 + \frac{h_4 - h_7}{h_1 - h_{6\,liq}} X_2 \qquad (21)$$

te slijedi :

$$0{,}043 = \frac{1552{,}823 - 1557{,}270}{1552{,}823 - (-4{,}841)} + \frac{424{,}143 - 186{,}950}{1552{,}823 - (-4{,}841)} X_1 + \frac{102{,}466 - 46{,}219}{1552{,}823 - (-4{,}841)} X_2$$

$0{,}043 = -\,2{,}855 \cdot 10^{-3} + 0{,}152\, X_1 + 0{,}036\, X_2$, uz uvjet iz (18)

$0{,}046 = 0{,}152\, X_1 + 0{,}036\, (0{,}504 - X_1)$

Kada se ova linearna jednadžba do kraja riješi dobivaju se ova rješenja :

$X_1 = 0{,}240$ (24,0 %)

$X_2 = 0{,}264$ (26,4 %)

5.2 Kompresori

Deklarirana snaga jednog pogonskog elektromotora je :

P (1 kompresor) = 21 kW

Kako u procesu sudjeluju 2 kompresora (dobiva se $V_{liq\ He}$ = 10 L/h) u idealnom radu ukupna snaga pogonskih elektromotora iznosi $P_{UK} = 2 \cdot$P (1 kompresor) = 42 kW.

Iz T – s dijagrama helija izračuna se idealni utrošeni rad kompresije po formuli :

$w_K = T_1 (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)$ (22)

$w_K =$ 298 (30,956 – 22,512) – (1552,823 – 1557,270)

$w_K =$ 2520,759 kJ/kg

Idealna snaga je :

P = $m_{uk} \cdot w_K$ = 0,0092 kg/s $\cdot$ 2520,759 kJ/kg = 23,19 kW (23)

a stupanj iskorištenja iznosi : $\eta_K = \frac{P}{P_{UK}} = \frac{23{,}19\ kW}{42\ kW} =$ 0,552 = 55,2 % (24)

Stupanj iskorištenja kompresora se također može izračunati i preko specifičnih radova :

P_{UK} = 42 kW $\rightarrow$ $w_{K,UK} = \frac{P_{UK}}{m_{uk}} = \frac{42\ kW}{0{,}0092\ kg/s} =$ 4565,217 kJ/kg (25)

te slijedi :

$\eta_K = \frac{w_K}{w_{K,UK}} = \frac{2520{,}759\ kJ/kg}{4565{,}217\ kJ/kg} =$ 0,552 = 55,2 % (26)

5.3 Ekspanderi

5.3.1 Usporedba dobivenih ekspanzijskih radova u idealnom i realnom procesu

Idealne adijabatske ekspanzije (idealni proces) :

$w_{E,1}$ = ($h_3 - h_{8\,id}$) $X_{1,id}$ = (424,143 – 86,746) · 0,122 = 41,162 kJ/kg (27)

$w_{E,2}$ = ($h_4 - h_{7\,id}$) $X_{2,id}$ = (102,466 – 23,749) · 0,382 = 30,069 kJ/kg (28)

$w_{E,ukupno}$ = $w_{E,1}$ + $w_{E,2}$ = 71,231 kJ /kg (29)

Realne politropske ekspanzije (realni proces) :

$w_{E,1}$ = ($h_3 - h_8$) X_1 = (424,143 – 186,95) · 0,240 = 56,926 kJ/kg (30)

$w_{E,2}$ = ($h_4 - h_7$) X_2 = (102,466 – 46,219) · 0,264 = 14,849 kJ/kg (31)

$w_{E,ukupno}$ = $w_{E,1}$ + $w_{E,2}$ = 71,775 kJ /kg (32)

Iz proračuna idealnog procesa (s izračunatim idealnim udjelima radne tvari koja ekspandira adijabatski) te realnog procesa (s realnim udjelima ekspandiranog dijela helija) vidljivo je iz (29) i (32) da su radovi dobiveni ekspanzijom gotovo jednaki za oba procesa, ali također se primjeti da se za prvu ekspanziju u idealnom procesu odvaja gotovo dvostruko manje helija nego u realnom procesu dok je ipak za drugu ekspanziju u realnom procesu potrebno ekspandirati 30% manje helija nego u idealnom procesu.

5.3.2 Stupnjevi iskorištenja ekspandera

Prvi ekspander :

$$\eta_{E,1} = \frac{h_3 - h_8}{h_3 - h_{8\,id}} = \frac{424{,}143 - 186{,}950}{424{,}143 - 86{,}746} = 0{,}703 = 70{,}3\ \%$$ (33)

Drugi ekspander :

$$\eta_{E,2} = \frac{h_4 - h_7}{h_4 - h_{7\,id}} = \frac{102{,}466 - 46{,}219}{102{,}466 - 23{,}749} = 0{,}715 = 71{,}5\ \%$$ (34)

Poznavanjem dobivenih stupnjeva iskorištenja ekspandera (detandera) također se mogu izračunati i stvarno ostvareni radovi ekspanzije (prethodno izračunati pod (30) i (31)) :

Prva ekspanzija :

$\eta_{E,1}$ = 0,703 = 70,3 %

X_1 = 0,240

$w_{E,1}$ = ($h_3 - h_{8\,id}$) X_1 $\eta_{E,1}$ = (424,143 – 86,746) · 0,240 · 0,703 = 56,926 kJ/kg (35)

Druga ekspanzija :

$\eta_{E,2}$ = 0,715 = 71,5 %

X_2 = 0,264

$w_{E,2}$ = ($h_4 - h_{7\,id}$) X_2 $\eta_{E,2}$ = (102,466 – 23,749) · 0,264 · 0,715 = 14,859 kJ/kg (36)

Iz formula (35) i (36) vidljivo je da je rad dobiven ekspanzijom u realnom procesu, za izračunate vrijednosti udjela radne tvari koje se ekspandiraju, manji od rada koji bi se dobio u idealnom procesu. Na odstupanje od idealnosti ukazuju i izentropski koeficijenti iskorištenja ekspandera koji su manji od 1.

Dio ukupno dobivenog rada u ekspanderima se koristi za regulaciju brzine ukapljivača, a preostali dio se rasipa u okolinu.

Iz izračunatih podataka o stvarnom radu kompresije i ekspanzije izračuna se ukupni jedinični rad koji je zapravo razlika utrošenog rada kompresije i ukupno dobivenog rada ekspanzijom po formuli (37) :

$$|w| = \frac{T_1 (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)}{\eta_K} - (h_3 - h_{8\,id}) X_1 \eta_{E,1} - (h_4 - h_{7\,id}) X_2 \eta_{E,2} \qquad (37)$$

odnosno : $|w| = w_K - w_{E,ukupno}$ = 4565,217 – 71,775 = 4493,442 kJ/kg (38)

Iz proračuna se vidi da je ukupni rad dobiven ekspanzijom izrazito mali u odnosu na utrošeni rad kompresije (rad dobiven ekspanzijom manji od 2% utrošenog rada kompresije).

5.3.3 Utrošena snaga i energija u procesu

Utrošena snaga u procesu je dana sljedećim izrazom :

$$\mathrm{P} = \frac{m_{uk} \cdot \mathrm{w}}{3600} = \frac{33{,}12\ \frac{kg}{h} \cdot 4493{,}442\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}}{3600} = 41{,}34\ \mathrm{kW} \qquad (39)$$

Jedinična utrošena energija za 1 kg kapljevitog helija u kWh/kg :

$$e_y = \frac{\mathrm{P}}{m_{liq\ He}} = \frac{41{,}34\ \mathrm{kW}}{1{,}413\ \frac{kg}{h}} = 29{,}26\ \mathrm{kWh/kg} \qquad (40)$$

Utrošena snaga u procesu i jedinična utrošena energija za ukapljivanje ukazuju na slabu ekonomičnost procesa zbog relativno velike potrošnje energije za dani iscrpak.

6 ZAKLJUČAK

Iz dobivenih eksperimentalnih podataka Kochovog ukapljivača je, pomoću programa REFPROP, koji omogućava uvid u veličine stanja i parametre velikog broja realnih radnih tvari te Excela, analiziran termodinamički proces ukapljivanja helija.

Proračun samog ukapljivanja omogućen je eksperimentalnim podacima tlaka i temperature pojedinih točki procesa na temelju kojih su dobivene potrebne veličine procesa kojima su izračunate razne značajke procesa u pogledu rada kompresije koji sa što većim postignutim maksimalnim tlakom uzrokuje i veću potrošnju rashladnog medija, ali i veći iscrpak helija. Zatim se provodio i proračun ekspandera kojim su se uspoređivali idealni i realni proces; u realnom procesu se dobio manji rad ekspanzije nego u idealnom na što ukazuje i izentropski stupanj iskorištenja ekspandera koji je manji od 1. Ukupni jedinični rad se računao kao razlika rada kompresije i ekspanzije gdje se dalo primjetiti da ukupni dobiveni rad ekspanzija iznosi tek oko 2% utrošenog rada kompresije. Na temelju ukupnog rada se računala i snaga u procesu kao i jedinična utrošena energija za ukapljivanje 1 kg helija čija je vrijednost relativno velika.

Iz analiziranog procesa ukapljivanja helija te provedenih proračuna iz podataka dobivenih u REFPROPU, može se primjetiti da je taj proces dugotrajan i izrazito osjetljiv, posebice jer se radi o jako niskim temperaturama u procesu. Također i uz česte probleme prilikom vođenja samog procesa, kao npr. zaleđivanja dijelova opreme, pucanja cijevi itd., dobiva se relativno mali iscrpak helija što ukazuje i na slabu ekonomičnost samog procesa.

7 POPIS OZNAKA I INDEKSA

Oznaka	Jedinica	Značenje
w	kJ / kg	specifični rad
T	K	apsolutna temperatura
s	kJ / kgK	specifična entropija
h	kJ / kg	specifična entalpija
L	m	duljinska dimenzija
ΔT	K	razlika temperatura
ΔT_{LM}	K	pokretačka sila prijenosa topline
$\dot{Q}$	W	toplinski tok
A	m^2	površina
F	-	korekcijski faktor
R_i	m^2 K / W	otpor prijenosu topline
$R_{k,kondukcija}$	m^2 K / W	otpor prijenosu topline kondukcijom
$R_{j,konvekcija}$	m^2 K / W	otpor prijenosu topline konvekcijom
α	W / m^2K	koeficijent prijelaza topline (na strani fluida)
λ	W / mK	koeficijent toplinske vodljivosti
R_f	m^2 K / W	otpor naslaga prijenosu topline
μ	K / Pa	Joule – Thomsonov koeficijent
u	kJ / kg	specifična unutarnja energija
Q	kJ	toplina
H	kJ	entalpija
W	kJ	rad
p	Pa	apsolutni tlak

V	m^3 / s	volumni protok tvari
η_K	-	stupanj iskorištenja kompresora
η_D(η_E)	-	(izentropski) stupanj iskorištenja detandera (ekspandera)
$V_{liq\ He}$	m^3 / s	volumni protok kapljevitog helija
$\rho_{liq\ He}$	kg / m^3	gustoća kapljevitog helija
$m_{liq\ He}$	kg / s	maseni protok kapljevitog helija
y	-	iscrpak
x	-	udio parne faze
$m_{eq\ He}$	kg / s	maseni protok helija (u ravnoteži)
m_{UK}	kg / s	ukupni maseni protok tvari
X	-	udio radne tvari odveden u ekspander
P	kW	snaga
P_{UK}	kW	ukupna pogonska snaga pri radu 2 kompresora
w_K	kJ / kg	specifični rad kompresora
$w_{K,UK}$	kJ / kg	ukupni specifični rad kompresora
w_E	kJ / kg	specifični rad ekspandera
$w_{E\ ,UK}$	kJ / kg	ukupni specifični rad ekspandera
|w|	kJ / kg	neto jedinični rad
e_y	kWh / kg	jedinična utrošena energija za ukapljivanje

INDEKSI

Oznaka	Značenje
LM	logaritamsko
f	Fauling
D (E)	detander (ekspander)
liq	kapljevito (stanje)
vap	plinovito (stanje)
eq	ravnotežno (stanje)
id	idealno
uk	ukupno
y	iscrpak
E	ekspanzija
K	kompresija

8 LITERATURA

[1] Budin R., Mihelić – Bogdanić A., Osnove tehničke termodinamike, 2. dopunjeno i izmijenjeno izdanje, Zagreb (2012.) 445.

[2] Rogošić M., Kemijsko – inženjerska termodinamika (nastavni tekstovi), Zagreb, 2013.

[3] Filipović I., Lipanović S., Opća i anorganska kemija, Školska knjiga, Zagreb (1995.) 638.

[4] Tehnička enciklopedija Leksikografskog zavoda M. Krleža, svezak 10 , članak Plemeniti plinovi

[5] https://www.physicsforums.com/threads/inversion-and-isenthalpic-curves-for-van-der-waals-eos.868434/ (pristup 12.7.2018.)

[6] https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Joule-Thomson+Effect (pristup 12.7.2018.)

[7] https://www.ecourses.ou.edu/cgi-bin/eBook.cgi?doc=&topic=th&chap_sec=04.2&page=theory (pristup 12.7.2018.)

[8] https://www.quora.com/In-ACs-and-refrigerators-why-the-capillary-tube-has-smaller-diameter-as-compared-to-its-length-Why-not-the-other-way-around (pristup 12.7.2018.)

[9] https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011227598001106 (pristup 22.7.2018.)

[10] Operator´s Manual, ADL – Collins helium liquefier and related systems (1966) 2-4 The helium compressor

[11] https://www.mag-commerce.com/zastupnistva/kompresori/klipni-kompresori/ (pristup 11.7. 2018.)

[12] https://www.quora.com/What-is-a-rotary-air-compressor (pristup 11.7.2018.)

[13] Sander A., Jedinične operacije u ekoinženjerstvu I. dio (interna skripta), Zagreb (2011.) 12. – 35.

[14] https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/srd/REFPROP8.PDF (pristup 12.7.2018.)

[15] http://www.ifs.hr/tehnologija/cryogenic-facility/ (pristup 13.7.2018.)

9 ŽIVOTOPIS

[redacted] Od 2003. do 2011. sam pohađao Osnovnu školu Sesvetski Kraljevec u Zagrebu. Završivši osnovnu školu, upisao sam Gimnaziju Sesvete u Zagrebu, smjer Opća gimnazija. Gimnaziju sam pohađao u periodu od 2011. do 2015. kada sam, položivši državnu maturu, upisao Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, smjer Kemijsko inženjerstvo. Trenutno sam student 3. godine preddiplomskog studija.