

Mogućnosti optimizacije procesa kompresije i ekspanzije u tekstilnoj industriji

Dr.sc. **Ivana Špelić**, dipl.ing.¹
Prof.dr.sc. **Alka Mihelić Bogdanić**, dipl.ing.²
Ivana Dorotić, bacc.ing.techn.text.
Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet
¹Zavod za odjevnu tehnologiju
²Zavod za temeljne prirodne i tehničke znanosti
Zagreb, Hrvatska
e-mail:ispelic@ttf.hr
Prispjelo 26.1.2018.

UDK 677.621.51
Izvorni znanstveni rad

Analizirane su mogućnost primjene i optimizacija procesa kompresije i ekspanzije u tekstilnoj industriji, kao što su predenje, bojadisanje, kemijsko čišćenje, teksturiranje, te hlađenje procesne vode i pneumatika odnosno pneumatsko upravljanje. U svakoj tekstilnoj tvornici optimizacija troškova uključuje kontrolu gubitaka kako vodene pare, tako i procesne vode, kondenzata i komprimiranog zraka. Tekstilna tvornica često proizvodi više komprimiranog zraka nego je to potrebno kako bi se osigurali dovoljno visoki tlakovi za rad potrošačkih uređaja. Pri tome valja naglasiti kako je optimizacija sustava s komprimiranim zrakom od presudne važnosti jer svaki potrošački uređaj zahtijeva specifičnu vrijednost tlaka zraka. To se postiže kalibriranjem izlaznog tlaka zraka u uređajima za generiranje komprimiranog zraka i osiguravanjem optimalnog tlaka zraka za svaki pojedini potrošački uređaj.

Ključne riječi: optimizacije procesa kompresije i ekspanzije, tekstilna industrija, optimizacija troškova, komprimirani zrak

1. Uvod

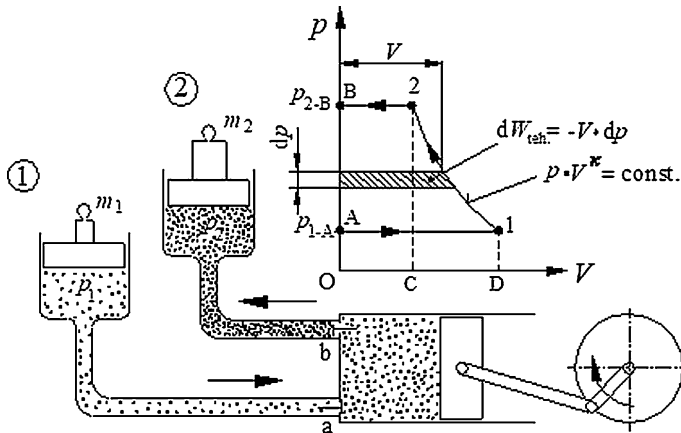
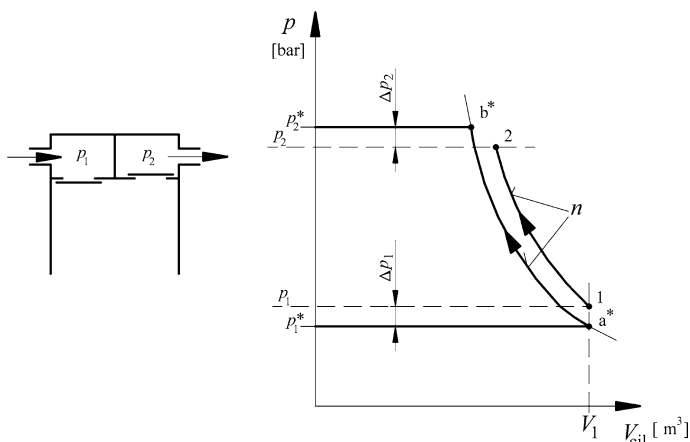
U procesima predenja, bojadisanja, ultrazvučnog pranja, kemijskog čišćenja, teksturiranja, te hlađenju procesne vode i pneumatici odnosno pneumatskom upravljanju primjenjuje se ekspanzija i kompresija. Električna energija, voda, tehnološka para, kao i komprimirani zrak najvažniji su energetske izvori u industrijskoj proizvodnji. Komprimirani zrak je glavni energetske resurs posebice u segmentu proizvodnje i obrade prirodnih i sintetskih vlakana, proiz-

vodnji pređa te u procesima teksturiranja vlakana i tkanina. Značajan je udio energetske potrošnje pri generiranju komprimiranog zraka u odnosu na ukupnu energetske potrošnju u tekstilnom sektoru jedne zemlje. U mnogim industrijskim postrojenjima sustavi s komprimiranim zrakom koriste više električne energije nego bilo koja druga vrsta opreme, a njihovom optimizacijom postižu se značajne uštede energije. Tijekom procesa kompresije zraka gubi se znatna količina topline. Optimizacija procesa kompresije i ekspanzije u tekstil-

noj industriji od presudne je važnosti kako bi se ostvarila optimizacija troškova, što uključuje kontrolu gubitaka kako vodene pare, tako i procesne vode, kondenzata i komprimiranog zraka [1].

2. Radni proces idealnog i stvarnog kompresora

Osnovne karakteristike kompresora su protok i postignuti tlak. Količina dobave i tlak zraka dvije su najznačajnije jedinice koje karakteriziraju tip nekog kompresora [2, 3].

Sl.1 Rad idealnog klipnog kompresora i proces u p - V dijagramu [4]

Sl.2 Odstupanje uslijed prigušnog procesa kod usisa i potiska [4]

Kompresori imaju mehaničke odnosno konstrukcijske sustave [3]:

- mehanizam pretvaranja energije,
- mehanizam za razvođenje zraka,
- mehanizam za upravljanje.

Mehanizam za pretvaranje energije ima funkciju konverzije mehaničke energije u pneumatsku energiju [4]. Klipni kompresori koriste pokretni klip u cilindru i motorni mehanizam, dok rotacijski kompresori koriste krilca ili suspregnuti zavojni par. Turbokompresori koriste odgovarajuće turbinsko kolo s lopaticama. Dakle, svi kompresori imaju mehanizam za pretvaranje energije [5].

Mehanizam za razvođenje razdvaja dvije zone, i to zonu niskog tlaka pri ulazu od zone sabijenog zraka na izlaznom dijelu kompresora, i nalazi se u svim kompresorima. Mehanizam za upravljanje imaju neki zavojni kompresori, i u takvim je kompresorima moguće regulirati količinu sabi-

jenog zraka za vrijeme rada kompresora.

Funkcije upravljanja i reguliranja definirane su prema namjeni kompresora, dok se njihova realizacija odvija uz pomoć odgovarajućeg sustava izvan kompresora, a pritom se misli na regulator tlaka, električno isključivanje/uključivanje elektromotora itd. Ove funkcije upravljanja i reguliranja podrazumijeva održavanje tlaka na izlazu, količinu sabijenog zraka, isključivanje/uključivanje kompresora itd.

Radni proces idealnog i stvarnog kompresora prikazan je u p - V dijagramu, sl.1, pri čemu površina C-2-B-0 predstavlja utrošeni rad. Neto utrošeni rad kompresora s idealnim plinom prikazan je površinom A-1-2-B.

Pomicanjem klipa iz krajnjeg lijevog položaja prema desno, klip u cilindru stvara podtlak, koji dalje nastoji nad-

vladati silu opruge usisnog ventila „a“, dok plin iz rezervoara 1 puni cilindar. Takav proces usisavanja podrazumijeva premještanje određene količine plina iz rezervoara 1 u cilindar. Pritom je plin karakteriziran veličinama stanja (p_1 , v_1 , t_1). Potiskivanjem klipa udesno, izvršava se rad usisavanja, koji iznosi $p_1 V_1$, gdje je V_1 volumen cilindra, odnosno volumen usisanog plina. Taj je rad prikazan površinom 0A1D u p - V dijagramu.

Tlak u cilindru počinje rasti pomicanjem klipa s desne u lijevu stranu. Ventil „a“ se zatvara, dok se ventil „b“ otvara u trenutku kada tlak u cilindru dosegne vrijednost p_2 u tlačnom spremniku. Proces od 1 do 2 predstavlja termodinamičku kompresiju plina u cilindru. Površinom D-1-2-C prikazan je utrošeni rad kompresije u p - V dijagramu.

Već komprimirani plin se daljnjim gibanjem klipa u lijevo i uz otvoreni ventil „b“ potiskuje dalje u rezervoar visokog tlaka. Pritom će veličine stanja plina (tlak, volumen i temperatura) u ovome dijelu procesa ostati konstantne (p_2 , v_2 , t_2), dok će utrošeni rad istiskivanja iznositi $p_2 V_2$.

Potrebno je napomenuti da stvarni proces klipnog kompresora razlikuje od procesa idealnog kompresora. Kod idealne kompresije zanemaren je volumen štetnog prostora gdje su smješteni usisni i tlačni ventili. Kod idealnih kompresora proces kompresije može biti izoterman, adijabatski i politropski. U stvarnosti je proces kompresije politropski [5].

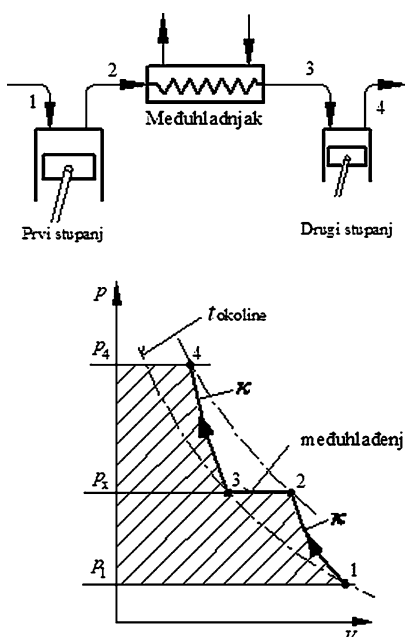
Kod usisavanja tlak zraka u cilindru je niži od onoga u rezervoaru ili niži od tlaka okoline. Takva razlika tlaka je neophodna pogotovo ukoliko se nastoji svladati otpor usisnog ventila ili otpor strujanja zraka kroz usisne kanale, usisni otvor itd. Osim toga, zbog ove razlike tlaka omogućuje se brzo punjenje cilindra, što je također neophodno.

Nasuprot tome, kada je riječ o pražnjenju cilindra, tada u njemu treba biti izvjestan pretlak u odnosu na tlačni spremnik ili tlačni cjevovod. Umjesto od 1 do 2, u kompresoru se komprimira plin od a^* do b^* . Kom-

presor troši više rada, a usisava manju količinu plina [4]. Kada se smanji tlak, tada se smanjuje i gustoća plina. Kad tlak opadne za Δp_1 , apsolutni tlak u cilindru je p_{1*} , smanjuje se gustoća plina i manje ga ulazi u cilindar [4]. Ovaj pad tlaka je prigušni proces pa entalpija radnog plina, a time i temperatura radnog plina ostaju nepromijenjene, sl.2.

2.1. Jednostupanjski i višestupanjski procesi kompresije i ekspanzije

Povećanjem broja stupnjeva smanjuje se utrošena snaga kompresora, kao i maksimalna temperatura komprimiranog zraka, u usporedbi s jednostupanjskim procesom [5]. Optimalni proces se najčešće postiže dvostupanjskom i višestupanjskom kompresijom, dok će svako daljnje povećanje broja stupnjeva sve manje utjecati na omjer snaga kompresije. Višestupanjska kompresija uz međuhlađenje do početne temperature prikazana je na sl.3. U svrhu postizanja visokih tlakova kompresije, potrebno je primijeniti višestupanjsku kompresiju uz međuhlađenje. Budući da se međuhlađenje obavlja uz pomoć medija iz okoline, i to zrakom ili vodom, ono je moguće isključivo do tempe-



Sl.3 Međuhlađenje do početne temperature kod dvostupanjske kompresije [4]

rature okoline [5]. Višestupanjskom kompresijom dolazi do smanjenja konačne temperatura, te uštede u radu. Što kompresor ima više stupnjeva, to je ušteda u radu veća (veće približavanje izotermnoj kompresiji pod uvjetom da se nakon svakog stupnja plin ohladi na početnu temperaturu) [4].

Optimalna višestupanjska kompresija mora zadovoljiti sljedeće uvjete [5]:

a) hlađenje plina u međuhladnjacima mora se provesti do početne temperature

$$T_1 = T_3 = T_5$$

b) kompresija u svim stupnjevima mora se voditi do iste konačne temperature

$$T_2 = T_4 = T_6$$

c) termodinamički proces u svim stupnjevima mora biti isti.

Uz zadovoljenje tih uvjeta, odnos tlakova i temperatura je:

prvi stupanj
$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

drugi stupanj
$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{T_4}{T_3}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

treći stupanj
$$\frac{p_6}{p_5} = \left(\frac{T_6}{T_5}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Iz jednakosti desnih strana jednadžbi proizlazi stupanj povišenja tlaka (α)

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_3} = \frac{p_6}{p_5} = \alpha$$

odnosno

$$\frac{p_2 \cdot p_4 \cdot p_6}{p_1 \cdot p_3 \cdot p_5} = \alpha^3$$

Kako je $p_2 = p_3$ i $p_4 = p_5$ slijedi:

$$\alpha^3 = \frac{p_6}{p_1} = \frac{p_{maks}}{p_{min}} \text{ ili } \alpha = \sqrt[3]{\frac{p_{maks}}{p_{min}}}$$

Označi li se broj stupnjeva kompresije sa z , dobiva se općenito

$$\alpha = \sqrt[z]{\frac{p_{maks}}{p_{min}}}$$

ili, budući da je obično $p_{min} = 1 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$:

$$\alpha = \sqrt[z]{p_{min}}$$

Tlak komprimiranog plina povećava se po stupnjevima prema zakonu geometrijske progresije s množiteljem α .

Temperatura je nakon adijabatske kompresije:

$$T_{maks} = T_{min} \left(\sqrt{\frac{p_{maks}}{p_{min}}}\right)^{\frac{k}{k-1}} = T_{min} \cdot \alpha^{\frac{k-1}{k}}$$

a nakon politropske:

$$T_{maks} = T_{min} \cdot \alpha^{\frac{n-1}{n}}$$

Rad višestupanjskog kompresora dobiva se kao zbroj radova utrošenih u svakom stupnju [5]:

$$l = l_I + l_{II} + l_{III} + \dots = l_z \text{ kJ / kg}$$

Uz jednak omjer tlakova po stupnjevima i jednake ulazne temperature radovi su

$$l = l_I + l_{II} + l_{III} + \dots = l_z$$

pa se dobiva općenito:

za adijabatu $l = z \cdot c_p \cdot \Delta T_{KC}$,

za politropu $l = z \cdot R \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \Delta T_{KC}$.

ukupna izmjena topline se sastoji iz toplina, koje treba odvesti cilindrima i toplina odvedenih u izmjenjivačima q_{iz} :

$$q_{uk} = z \cdot q_{KC} + (z-1) \cdot q_{iz}$$

pa se dobiva:

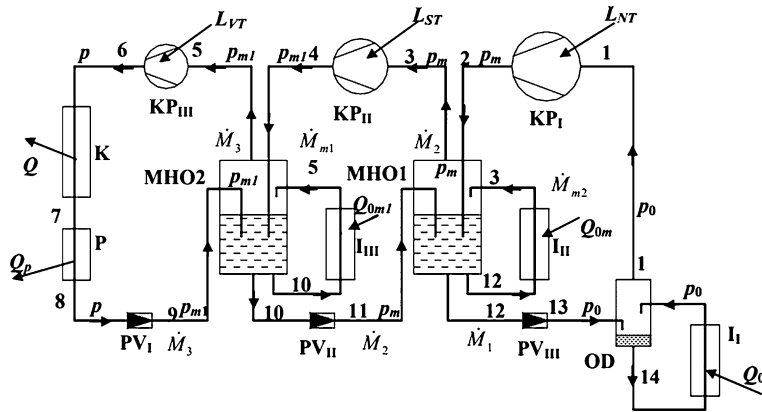
za adijabatu ($q_{KC} = 0$)

$$q_{uk} = (z-1) \cdot q_{iz} = (z-1) \cdot c_p \Delta T_{iz}$$

za politropu:

$$q_{uk} = z \cdot q_{KC} + (z-1) \cdot q_{iz} = z \cdot \left| c_v \frac{n-k}{n-1} \Delta T_{KC} + (z-1) \cdot c_p \Delta T_{iz} \right|$$

Ako su početni i krajnji tlak zadani, optimalni međutlak je onaj kod kojeg je ukupan rad kompresora najmanji [4]. Prvi i drugi stupanj kompresora



Sl.4 Shematski prikaz trostupanjske kompresije [6]

ostvaruju se uz isti omjer tlakova i iste izlazne temperature. Volumetrijski stupanj djelovanja, tj. iskorištenje kompresora koji se izražava kao omjer volumena usisanog plina i stajalnog volumena, ovisi o volumenu štetnog prostora, omjeru tlakova i termodinamičkoj promjeni stanja. Uz isti volumen štetnog prostora i termodinamički proces, volumetrijski stupanj djelovanja opada porastom omjera tlakova. Ovisno o promjeni stanja uz isti volumen štetnog prostora i omjer tlakova, volumetrijski stupanj djelovanja raste porastom eksponenta politrope n . Što je veći volumen štetnog prostora uz isti omjer tlakova i toplinski proces, volumetrijski stupanj je manji, a to znači smanjenu masu komprimiranog radnog medija [4, 5]. Proces trostupanjske kompresije prikazan je na sl.4.

2.2. Karakteristični uređaji kod kojih se primjenjuje kompresija i ekspanzija

2.2.1. Kompresori

Kompresori su radni strojevi odnosno uređaji kojima se komprimira plin ili para na viši tlak. Drugim riječima, plinovima ili parama povisuje se energetska razina. Kompresori se mogu podijeliti temeljem nekoliko kriterija, prema načinu rada, izvedbi kućišta, dobavi, radnim tlakovima i granicama primjene [6]. U suvremenoj proizvodnji vrlo je rasprostranjena primjena komprimiranog zraka, te drugih plinova ili para. Komprimirana

ni zrak ima ulogu prijenosnika energije koja je potrebna za provođenje mehaničkih radnih zadataka. Kapacitet ili dobava klipnog kompresora predstavlja količinu plina u kg/h kojeg kompresor usisava, a zatim komprimira i potiskuje u neki spremnik. Komprimirani plin koristi se za pogon pneumatskih čekića, bušilica i ostalih alata, pneumatski transport rastresitih materijala, pneumatski transport kapljevine i drugih plinova, miješanje i raspršivanje kapljevine, miješanje i dovođenje kisika biološkim suspenzijama, filtriranje pod tlakom ili vakuumom, pogon visokih peći za proizvodnju sirovog željeza, pogon metalurških peći u proizvodnji čelika i obojenih metala, punjenje kesona i dizanje potonulih brodova, ventilaciju rudničkih prostora i uređaja, pogon plinskih turbina i avionskih mlaznih motora, ukapljivanje zraka po Joule-Thomsonovom prigušnom efektu [6].

U modernoj procesnoj proizvodnji, kao i u procesno kemijskoj proizvodnji, osim zraka, izuzetno su važni i komprimirani plinovi i pare. Primjerice, zbog povišenog tlaka povećava se sposobnost kapljevine za apsorpcijom plinova. Osim toga, povišenim tlakom i temperaturom plinova, omogućuje se i ubrzanje odvijanje njihovih međusobnih kemijskih reakcija. U procesnoj tehnici komprimiraju se različiti plinovi u čeličnim bocama i spremnicima, prilikom transporta plinskim dalekovodima, za sintezu metanola i amonijaka, te u proizvod-

nji modernih plastičnih masa, prehrambenoj industriji, pivarstvu itd. Ovisno o načinu povećanja tlaka kompresori se dijele na [2-5]:

1. Dinamički (strujni) kompresori s kontinuiranim radnim procesom (povećanje kinetičke energije plina ubrzanjem strujanja, a zatim pretvaranje te kinetičke energije u tlak usporavanjem u difuzoru).
2. Volumetrijski (istiskivajući) kompresori sa sukcesivnim ponavljanjem svoga radnog mehaničkog ciklusa, direktno sabijanje plina smanjivanjem njegovog volumena.

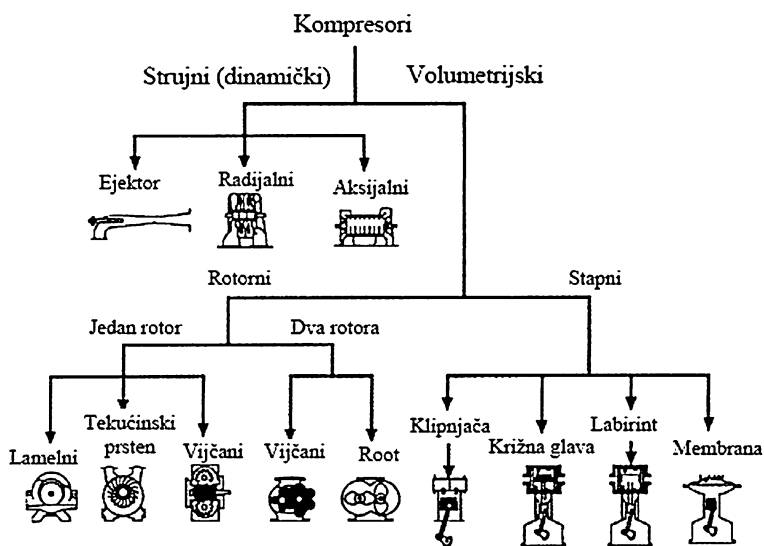
Volumetrijski tip rada podrazumijeva da se uz pomoć konstrukcijskih elemenata u kompresoru postigne takav prostor koji će biti u mogućnosti osigurati smanjenje volumena plina ili pare, i to na putu od ulaza do izlaza iz kompresora. Na takvom načelu grade se stepni (kompresori s oscilirajućim stapom) i rotorni kompresori koji se još nazivaju kompresori s rotirajućim stapovima (lamelni, s ekscentričnim rotorom, vijčani i kompresori sa zavojnicom – „scroll“.

Kompresori se mogu podijeliti prema sljedećim kriterijima [6]:

- načinu rada,
- izvedbi kućišta,
- dobavi,
- radnim tlakovima i
- granicama primjene.

Kategorizacija kompresora prema načinu rada [4], sl. 5:

- A. strujni ili dinamički kompresori
 - a1. ejektor, odnosno mlazni kompresori
 - a2. turbokompresori (radijalni, odnosno centrifugalni i aksijalni)
- B. volumetrijski (istiskivajući) kompresori
 - b1. oscilatorni (engl. *reciprocating*) kompresori: klipni kompresori (bez križne glave), stepni kompresori (s križnom glavom), labirintni kompresori i membranski kompresori.
 - b2. rotacijski kompresori
 - b2.1. rotacijski kompresori s jednim rotorom: krilni (lamelni), s tekućinskim



Sl.5 Podjela kompresora po načinu rada [6]

prstenom, spiralni, s ekscentričnim rotorom i vijčani.

b2.2. rotacijski kompresori s dva ili tri rotora: vijčani i roots-kompresori.

Kompresori, koji rade u skladu s dinamičkim načelom rada dijele se na ejektore, radijalne i aksijalne kompresore. U radnom procesu, plin se komprimira koristeći sile i pojave do kojih može doći uslijed ubrzavanja i/ili usporavanja radnog medija [6]. Prema izvedbi kompresori koji se koriste u sustavu hlađenja dijele se na otvorene, poluhermetičke i hermetičke, što ovisi o načinu ugradnje pogonskog motora.

Za otvoreni kompresor karakteristično je da je pogonski motor odvojen od kompresora, hlađen je zrakom, a kako bi se mogao spriječiti izlaz radnog medija iz kompresora, otvoreni kompresor trebao bi imati brtvenicu vratila, sl.6.

I kod hermetičkih i kod poluhermetičkih kompresora, elektromotor i kompresor ugrađuju se u isto zabrtvljeno kućište, sl.7 i 8. Namotaji elektromotora hermetičkih i poluhermetičkih kompresora hlade se radnim medijem, što omogućuje ugradnju manjih elektromotora veće efikasnosti hlađenja nego kod otvorenih kompresora. Kućište poluhermetičkog kompresora je zatvoreno uz pomoć

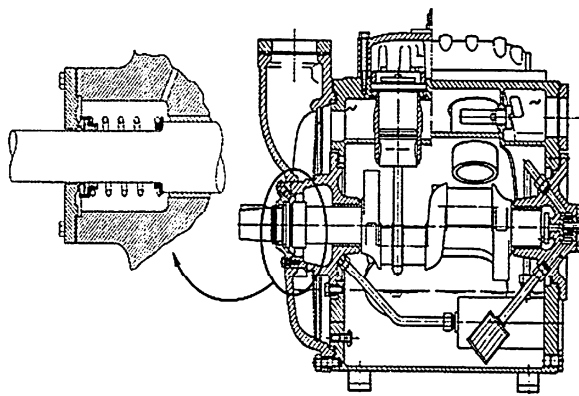
prirubnice koja se može rastaviti za potrebe servisa, a kod hermetičkih kompresora, kućište je zavareno.

Dobava se odnosi na stanje plina na usisnom priključku. S obzirom na dobavu radnog medija, kompresori se dijele na [6]:

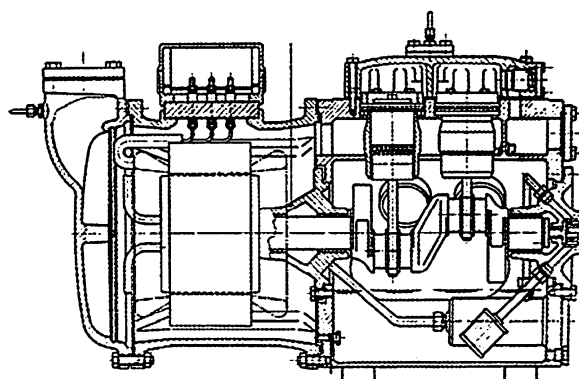
- male kompresore (do 10 m³/min),
- srednje kompresore (10 do 100 m³/min),
- velike kompresore (iznad 100 m³/min).

U ovisnosti o konačnom tlaku za koji je kompresor namijenjen, razlikuju se [6]:

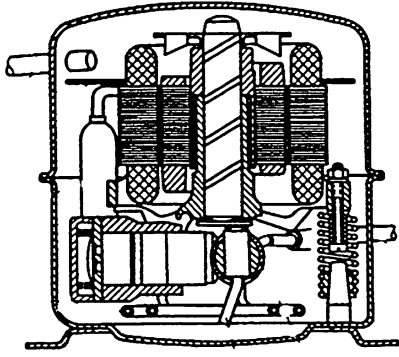
- vakuum crpke koje služe za transport plinova i para iz prostora u kojima vlada podtlak,
- puhaljke za konačne tlakove do 3 bar, čija je namjena npr. za ispiranje kod dvotaktnih motora, dobava zraka za visoke peći i sl.,
- niskotlačni kompresori za konačne tlakove koji se kreću u granicama od 3 do 12 bar (pneumatski alati, automatska regulacija, rashladni uređaji i sl.),
- srednjetačni kompresori za konačne tlakove koji se kreću u granicama od 10 do 150 bar (kemijska i naftna industrija, pokretanje razni mehanizama i uređaja i sl.),



Sl.6 Otvorena izvedba rashladnog kompresora [6]



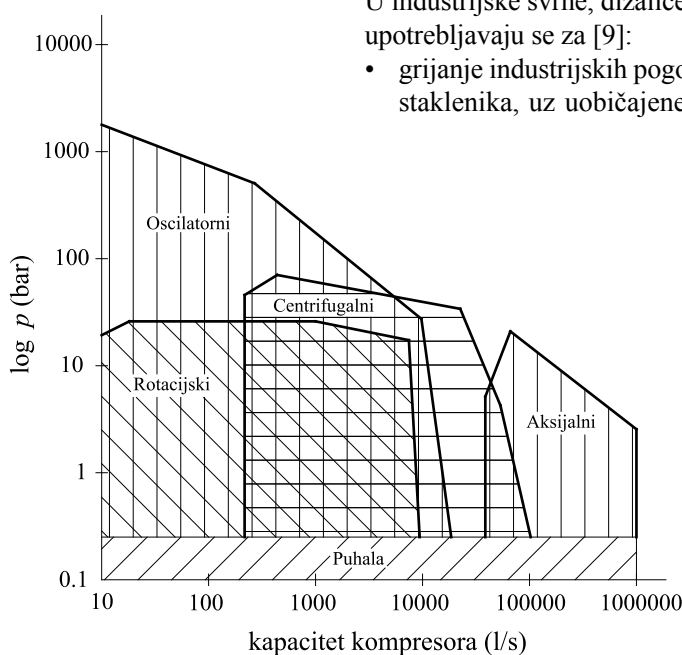
Sl.7 Poluhermetička izvedba rashladnog kompresora [6]



Sl.8 Hermetička izvedba rashladnog kompresora [6]

- visokotlačni kompresori za konačne tlakove koji se kreću u granicama od 200 do 2500 bar (kemijska industrija - sinteza plinova pod tlakom, punjenje boca sa stlačnim plinovima i sl.).

Područja rada lamelnih i vijčanih kompresora nalaze se oko granice između područja primjene stapnih kompresora s oscilirajućim stapom i turbokompresora. Na sl.9 su prikazane granice primjene različitih vrsta kompresora. U dijagramu na sl.9 na ordinati je prikazan tlak p (bar), dok se na apscisi nalaze vrijednosti doba ve kompresora V (l/s).



Sl.9 Područje rada pojedinih tipova kompresora [4,8]

2.2.2. Dizalice topline i rashladni uređaji

Dizalice topline ili toplinske pumpe su transformatori kod kojih je minimalna temperatura jednaka ili viša od temperature okoline, a maksimalna viša od temperature okoline. Postoje različiti izvori topline koje koriste toplinske dizalice (okolni zrak, podzemne vode, tlo, itd.). Prva velika dizalica topline puštena je u rad 1930./1931. godine u Losu Angelesu i bila je vlasništvo kompanije za elektrodistribuciju, te ju je činio rashladni sustav učinka 1,6 MW za hlađenje komora [9]. Nakon prve energetske krize, početkom 1970-ih godina zabilježena je sve veća uporaba dizalica topline, pa čak i tamo gdje nije bilo potrebe za hlađenjem. Nacionalni savezi za energetiku pokazali su veliko zanimanje za dizalice topline, koje se najčešće koriste za grijanje, ventilaciju i klimatizaciju. Upravo je takav uređaj postao jednim od strateških rješenja u području osiguravanja toplinske energije u kućanstvima. Otprilike u isto vrijeme zabilježeno je i povećanje proizvodnje takvih uređaja koji za pogonsku energiju koriste tekuće ili plinovito gorivo i time omogućuju postizanje više temperature vode za grijanje.

U industrijske svrhe, dizalice topline upotrebljavaju se za [9]:

- grijanje industrijskih pogona, npr. staklenika, uz uobičajene toplin-

ske izvore, ili otpadnu toplinu iz industrijskih izvora,

- zagrijavanje industrijske vode, npr. do temperaturnog područja od 40 do 90 °C,
- proizvodnju vodene pare do temperature od 150 °C, i
- sušenje i odvlaživanje u raznim granama industrije do maksimalne temperature do 100 °C.

Osim u industriji, dizalice topline koriste se i u stambenim i poslovnim zgradama, i to za grijanje prostora i potrošne tople vode, kao i za hlađenje prostora i sl. Okolni zrak jedan je od najvećih i najpristupačnijih ogrjevnih spremnika topline za dizalice topline. Nedostatak zraka kao izvora topline su varijacije njegove temperature s obzirom na godišnje doba, što znatno utječe na toplinsko iskorištenje i ogrjevni učinak dizalice topline [10]. Osnovni elementi toplinske pumpe su kompresor, kondenzator, prigušni ventil i isparivač [5].

Dizalica topline posreduje u prijenosu topline između dva toplinska spremnika [10]:

- nisko-temperaturnog, kojem se toplina (energija) odvodi,
- visoko-temperaturnog, kojem se ta toplina dovodi, a uvećana je za energiju kompresije.

Moguće je koristiti i podzemne vode i tlo kao izvor topline. Zemlja je kao izvor topline vrlo povoljna jer već u malim dubinama ima prilično konstantnu temperaturu (7 – 13 °C na dubini 2 m). Izmjenjivač topline se u tlo može položiti u obliku snopa vodoravnih cijevi, i to na dubini do 1,5 metra, a međusobni razmak cijevi treba biti od pola metra do jednog metra, što će ponajviše ovisiti o sastavu i vrsti tla [10].

U tekstilnoj industriji najčešće se koriste dizalice topline koje kao izvor koriste neki vodeni medij pri temperaturama većim od +4°C, jer je izvor topline vrlo pristupačan i jeftin. Kada se radi o takvim dizalicama topline, postavljeni su visoki zahtjeve za izvedbu i rad takvih dizalica [10]:

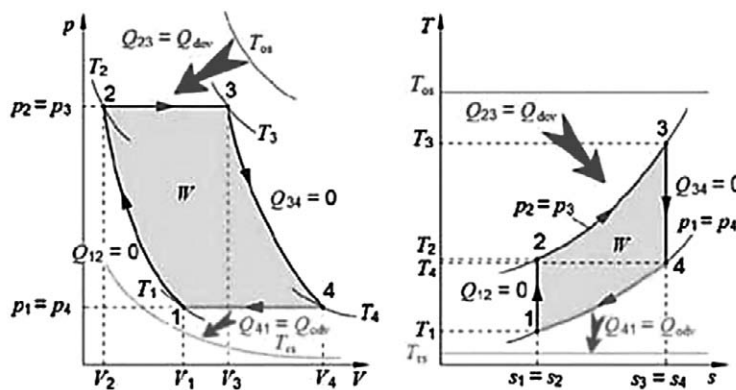
- izrada hidrogeološke preliminarne studije,

- radove smiju izvoditi isključivo ovlaštteni izvođači,
- visoki zahtjevi za izradu bunara i filtracijskog sloja,
- iskorištene podzemne vode moraju se utisnuti natrag u podzemlje,
- površinska zaštitna kolona i poklopac za zaštitu od površinskih voda i kiše,
- bunari se ne smiju izvoditi na cestama, ulazima ili parkirališnim prostorima,
- omogućiti pristup za kontrolu bunara.

2.2.3. Plinske turbine

Plinske turbine su uređaji koji se najčešće primjenjuju kao dodatni izvor električne energije, tj. za pokrivanje vršnih opterećenja [5]. Na ulazu u plinsku turbinu nalazi se kompresor, koji povećava tlak zraka, a smanjuje mu se volumen. U aksijalnom kompresoru zrak se komprimira do maksimalnog tlaka. Gorivo u plinovitom ili tekućem stanju izgara u komori za izgaranje pri čemu nastaju plinovi izgaranja koji zagrijavaju komprimirani zrak. Produkti izgaranja s velikom brzinom i protokom ulaze u ekspanzionu turbinu, gdje se preko mlaznica usmjeruje na lopatice u kretanju, a ispušni plinovi izlaze sa smanjenom temperaturom i tlakom. Plinske turbine su vrlo pouzdani, raspoloživi i učinkoviti strojevi pa često nalaze svoju primjenu u industriji [11].

Postrojenja s plinskim turbinama rade s izobarnim dovodom i odvodom topline, a proces može biti otvoren, poluzatvoren i zatvoren. Kod otvorenih procesa, ukupna smjesa zraka i plinova izgaranja nakon ekspanzije započinje ispuštanje u okolinu, dok kompresor kontinuirano usisava okolni zrak. Kod poluzatvorenog procesa, dio smjese zraka i plinova izgaranja neprestano je prisutan u postrojenju, dok radni medij u kompresoru i turbini ne sudjeluje u procesu izgaranja kod zatvorenog procesa. U otvorenom i poluzatvorenom procesu radni medij je zrak, a korištena goriva su tekuće ili plinovito gorivo.



Sl.10 Termodinamički teoretski proces plinske turbine prikazan u p-v i T-s dijagramu [11]

Kruta goriva ne mogu se primjenjivati jer u plinskoj turbini ekspandira smjesa zraka i plinova izgaranja, pa bi čestice pepela negativno djelovale na lopatice turbine. U zatvorenom prostoru moguće je osim zraka koristiti i neke druge plinove, kao što su helij, a također je moguće primijeniti i kruta goriva, budući a plinovi izgaranja ne dolaze u doticaj s radnim dijelovima turbine, pa se time izbjegava korozija materijala i erozija lopatica [5].

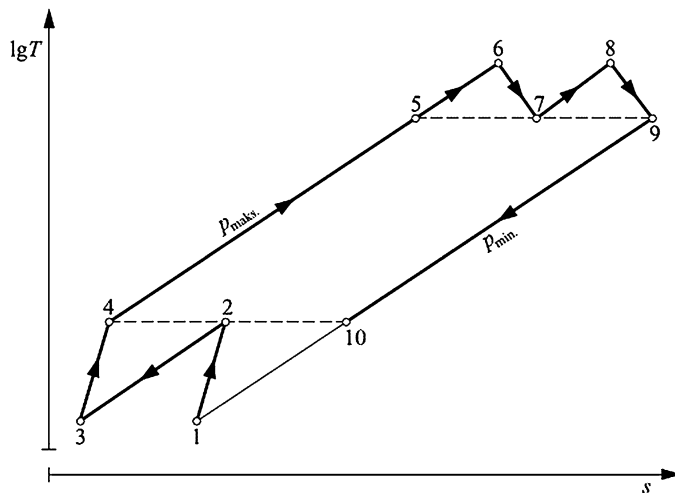
Poboljšanje procesa u plinskim turbinama moguće je ostvariti zagrijavanjem zraka nakon kompresije, plinskim turbinama s dvostupanjskom kompresijom, plinskim turbinama s dvostupanjskom ekspanzijom, plinskim turbinama s dvostupanjskom kompresijom i dvostupanjskom ekspanzijom.

Plinske turbine su ovisne o svemu što mijenja gustoću ili maseni protok zraka na usisu kompresora. Drugim riječima, kod plinskih turbina izražena je ovisnost o realnim atmosferskim uvjetima u kojima se nalaze za vrijeme trajanja eksploatacije. Smanjenjem masenog protoka zraka, smanjuje se i izlazna snaga plinske turbine, ali i količina dimnih plinova. Termodinamički kružni proces po kojem plinovi proizvode rad u plinskoj turbini naziva se Braytonov ciklus, a u osnovi je to teorijski desnokretni Jouleov proces otvorenog tipa [11].

Na sl.10 prikazan je termodinamički teorijski proces plinske turbine prikazan u p-v i T-s dijagramu, koji se

odvija između dvije izobare i dvije adijabate (izentrope). Proces započinje usisom zraka iz okoliša, što je prikazano stanjem 1. Zatim se nastavlja komprimiranje zraka do stanja 2, a od stanja 2 do stanja 3, toplina se predaje komprimiranom zraku, i to putem izgaranja goriva uz konstantni tlak. Od stanja 3 do stanja 4 proces se nastavlja adijabatskom ekspanzijom pri čemu se dobiva rad. Jedan dio rada koristi se za pogon kompresora, a preostali dio za proizvodnju električne energija. Od stanja 4 do stanja 1, smjesa zraka i dimnih plinova se odvodi u okoliš.

Kod plinskih turbina sa zagrijavanjem zraka nakon kompresije okolni se zrak komprimira do maksimalnog tlaka u procesu, a nakon toga se uvodi u izmjenjivač topline (često nazivan regeneratom). Tu se komprimirani zrak zagrijava uz pomoć smjese zraka i plinova izgaranja, koji se potom hlade. Za smjesu zraka i plinova izgaranja na izlazu iz ekspanzijske turbine, karakteristična je visoka temperatura, stoga se u okolinu odvodi znatna količina topline. Upravo zbog poboljšanja procesa, takva otpadna toplina primjenjuje se za zagrijavanje zraka nakon procesa kompresije. Zbog toga dolazi do smanjenja topline koja se uz pomoć goriva dovodi u komoru izgaranja, a povećava se termodinamički stupanj iskorištenja. Dakle, zbog zagrijavanja zraka nakon kompresije otpadnom toplinom, dolazi do smanjenja potrošnje goriva u usporedbi s uređajem bez regenera-



Sl.11 Proces dvostupanjske kompresije i dvostupanjske ekspanzije u $\lg T, s$ dijagramu [5]

tora, a pritom je riječ o identičnoj maksimalnoj temperaturi. Proizlazi da se primjenom regeneratora može smanjiti količina topline koja se odvodi u okolinu [5].

Plinske turbine s dvostupanjskom kompresijom temelje svoj rad na činjenici da se povećanjem broja stupnjeva smanjuje se utrošena snaga kompresora u usporedbi s jednostupanjskim procesom, dok se višestupanjskom kompresijom smanjuje snaga za pogon aksijalnog kompresora, pa je omjer ove snage i snage dobivene ekspanzijom bolji nego kod jednostupanjske kompresije. Kompresijom će se povisiti temperatura, i to u svakom stupnju, a optimalni proces može se postići isključivo uz jednaki omjer temperatura. Također vrijedi i da će se uz jednaki omjer temperatura, što prati i jednaka promjena stanja, postići odnosno dobiti i jednaki omjer tlakova. Dvostupanjskom kompresijom povećava se ukupna snaga postrojenja, jer se smanjuje pogonska snaga aksijalnog kompresora, a usporedbom dvostupanjskog kompresora bez regeneracije i jednostupanjskog procesa uz regeneraciju topline, stupanj iskorištenja dvostupanjskog procesa ne mijenja se bitno [4]. U dvostupanjskom procesu bez regeneracije topline, temperatura na ulazu u komoru je niža, pa se time i troši više goriva, dok je zbog niže temperature na izlazu iz kompresora

omogućeno bolje iskorištenje plinova izgaranja u regeneratoru. Upravo je to razlog zbog kojeg se dvostupanjski procesi provode uz postupak zagrijavanja zraka nakon drugog stupnja kompresije.

Povećanje dobivene snage i stupnja djelovanja moguće je postići i dvostupanjskom ekspanzijom. Optimalan proces postići će se uz jednak omjer temperatura na početku i na kraju ekspanzije, uz jednaku promjenu stanja. Ovakva vrsta ekspanzije s međuzagrijavanjem, pretežito se primjenjuje uz regeneraciju topline. U usporedbi s dvostupanjskom kompresijom ovakav proces povećava snagu postrojenja, ali ne i stupanj djelovanja [5].

Višestupanjskom kompresijskim i višestupanjskom ekspanzijom postiže se najveće poboljšanje procesa u plinsko turbinskim postrojenjima, a najčešće se, međutim, primjenjuje uređaj s dvostupanjskim procesima, jer daljnje povećanje broja stupnjeva ne utječe znatnije na stupanj djelovanja. Hlađenje u međuhladnjaku odvija se pri konstantnom tlaku do početne temperature, a kompresijom u drugom stupnju postiže se konačni tlak. Nakon toga zrak se zagrijava u regeneratoru, te potom ulazi u prvu komoru izgaranja i tamo se izobarnim dovodom topline postiže maksimalna temperatura. U prvoj turbini smjesa zraka i plinova izgaranja eks-

pandira do međutlaka pri kojem se u drugoj komori izgaranja počinje zagrijavati ponovno do maksimalne temperature. Ekspanzija u drugoj turbini protječe do tlaka okoline, dok se plinovi izgaranja odvođe u regeneratore. Proces dvostupanjske kompresije i ekspanzije prikazan je na sl.11. Toplina plinova izgaranja, koja se odvodi koristi se za zagrijavanje komprimiranog zraka, i to uz potpunu regeneraciju, te se na kraju dimni plinovi odvođe u okolinu [5]. Iako se korištenjem ovakvih postrojenja postiže veća snaga, ona su u praksi rjeđe prisutna zbog većih investicijskih i pogonskih troškova, kao i troškova održavanja u usporedbi s jednostavnim uređajima. U praksi se najčešće primjenjuju kao dodatni izvor električne energije. Uglavnom se koriste jednostavni uređaji s otvorenim procesom i regeneracijom topline, čime se smanjuje potrošnja kvalitetnog goriva. Osim toga, u usporedbi s ostalim motorima s unutrašnjim izgaranjem, ova postrojenja manje zagađuju okolinu s negorivim ugljikovodicima jer koriste veliki suvišak zraka [5].

3. Primjena procesa kompresije i ekspanzije u tekstilnoj industriji

Tekstilna industrija je jedna od najstarijih i najsloženijih proizvodnih industrija u svijetu, koja se bavi dizajnom, proizvodnjom i distribucijom pređe, tekstilnih materijala, odjeće za široku potrošnju, proizvoda namijenjenih za uporabu u drugim industrijama kao što su proizvodi za automobilsku industriju, proizvodnjom namještaja i tehničkog tekstila, itd. Pri tome se troše velike količine električne energije, komprimiranog zraka i tehnološke pare. Udio komprimiranog zraka u ukupnoj konačnoj potrošnji energije u tekstilnom sektoru jedne zemlje je velik.

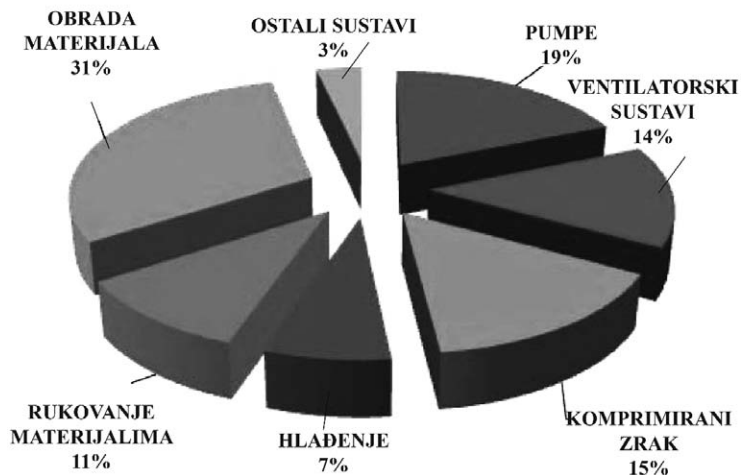
U mnogim industrijskim postrojenjima kompresori zraka koriste više električne energije nego bilo koja druga vrsta opreme. Tijekom procesa

kompresije zraka gubi se znatna količina otpadne topline. Mnoge proizvodne industrije također koriste komprimirani zrak i plin za izgaranje i operacije poput oksidacije, frakcioniranja, hlađenja, filtriranja, dehidracije i prozračivanja [12]. Komprimirani zrak je potreban u većini faza proizvodnje tekstila [13]. Prerada materijala ima najveći udio energije koju koriste pogonski motori (31 %), a slijede ih toplinske pumpe (19 %), sustavi s komprimiranim zrakom (15 %) i ventilatorski sustavi (14 %) [14].

Komprimirani zrak je jedan od najvažnijih energetske izvora u industrijskoj proizvodnji, zajedno s električnom energijom, vodom i tehnološkom parom. Prema nekim procjenama postrojenja snage 4000 do 5000 MW koriste se godišnje u Sjedinjenim američkim državama (SAD) kod sustava s komprimiranim zrakom, pri čemu 85 do 90 % troškova otpada na energetske gubitke kompresora, a 10 do 15 % na početno ulaganje i održavanje samog kompresora. Komprimirani zrak je glavni energetski resurs u tekstilnoj industriji, posebice u segmentu proizvodnje i obrade što prirodnih i sintetskih vlakana, proizvodnje pređa, u procesima teksturiranja, itd. [12, 14]. Na sl.12 je prikazana raspodjela energetske potrošnje u tekstilnoj industriji SAD-a, iako valja napomenuti kako su tkalački industrijski pogoni znatno veći potrošači komprimiranog zraka.

Komprimirani zrak u tekstilnoj i odjevnoj industriji koristi se za slijedeće uređaje [12-14]:

- uređaj za slaganje,
- transportni sustavi,
- strojevi za tiskanje,
- strojevi za pređenje,
- detektor za navoje,
- strojevi za tkanje,
- uređaji s pneumatikom,
- proizvodnja pređa i lijevanje,
- šivaći stroj,
- teksturiranje i nanos apretura,
- automatizirana oprema,
- agitacija tekućina,
- čišćenje,



Sl.12 Raspodjela energetske potrošnje u tekstilnoj industriji [14]

- pneumatski nadzor i aktuatori,
- rashladni sustav i
- vakuumiranje i stlačivanje.

U tekstilnoj industriji najčešće se koriste vijčani kompresori jer su energetski učinkovitiji u usporedbi s klipnim kompresorima. Za industrijske pogone velikih proizvodnih kapaciteta najčešće se koriste centrifugalni kompresori.

Jedna od mogućih primjena turboekspandera je pri proizvodnji dušične kiseline, koja potom služi kao sirovina u proizvodnji plastike i sintetskih vlakana. Druga je uporaba turboekspandera pri proizvodnji pročišćene tereftalatne kiseline (engl. *purified terephthalic acid, PTA*) i dimetil-tereftalata (DMT), koji služe kao osnovne sirovine za proizvodnju poliesterskih vlakana [15].

Polietilentereftalat (PET) je polimer iz skupine poliestera, koji se može sintetizirati esterifikacijskom reakcijom između tereftalne kiseline i etilen glikola ili transesterifikacijskom reakcijom između etilen glikola i dimetil tereftalata [16].

Prema većini studija provedenih u SAD-u, Europi i Indiji, uočeno je kako je samo 55 % do 65 % potrošene energije iskorišteno u sustavima s komprimiranim zrakom, a preostali dio otpada na velike energetske gubitke [14]. Financijska vrijednost pojedinih izvora energije uvelike varira ovisno o njihovoj dostupnosti i kvaliteti. Električna i mehanička energija

su uobičajeno najjeftinije, a nakon njih slijedi toplinska energija. Ekonomski proračuni najčešće sugeriraju izbjegavanje korištenja energetskih izvora u opsegu većem od potrebnog za izvođenje neke aktivnosti ili funkcioniranje nekog procesa. Takav je primjer uočen pri grijanju prostora električnom energijom. Električna energija se pri tome primjenjuje kako bi se temperatura zatvorenog prostora digla do 20 °C. No takav način zagrijavanja prostora izvorima električne energije je ekonomski neisplativ i za uporabu u kućanstvima i za uporabu u industrijskim pogonima. Višak električne energije je dostupan tijekom noći pa se električna energija često prodaje po pristupačnijim cijenama potrošačima koji je koriste za grijanje prostora. S aspekta smanjenja materijalnih troškova ekonomičnije je primijeniti druge izvore energije poput sustava s komprimiranim zrakom i toplinske pumpe, čime se smanjuje termodinamička ireverzibilnost [13].

Najčešći uzroci energetske gubitaka u tekstilnoj industriji pri primjeni sustava s komprimiranim zrakom su posljedica [12]:

- nezadovoljavajuće kontrole i održavanja kompresora,
- gubitak tlaka pri prenošenju i distribuciji zraka unutar sustava i prema potrošačima,
- neplanirani gubici zraka,
- nepredviđena kondenzacija,

- nezadovoljavajuća kvaliteta zraka koji struji kroz sustave s komprimiranim zrakom uslijed promjene tlaka zraka, nedozvoljavajuće razine vlage u zraku, onečišćenja zraka, itd.,
- uporaba previsokih vrijednosti tlaka zraka za potrebe sustava s komprimiranim zrakom ili potrošačkih uređaja, i
- neadekvatno održavanje sustava.

Ukoliko se sustavi s komprimiranim zrakom pravilno održavaju i upravljaju, rezultat takvog rada će biti sustav s komprimiranim zrakom, koji se opskrbljuje s suhim zrakom ujednačenog tlaka, što će rezultirati energetskim uštedama u cjelokupnom proizvodnom procesu. Eventualni energetski gubici se mogu smanjiti pravilnim održavanjem dotoka zraka i konačnog komprimiranog zraka koji se odvodi potrošačkim uređajima [12].

Najveće energetske uštede u tekstilnoj industriji moguće su kroz praćenje kvalitete zraka u sustavima s komprimiranim zrakom i kroz redovito održavanje takvih sustava. Pri tome valja paziti na obnavljanje instalacija u proizvodnim sustavima, redovitu zamjenu kompresora i kupnju suvremenijih sustava s komprimiranim zrakom. Nadalje treba redovito održavanje ostalih jedinica u proizvodnom pogonu u bliskom doticaju s kompresorskom jedinicom, kao što su sušionici i filteri, na procjenu optimalnog tlaka zraka koji je potreban za pravilan rad sustava s komprimiranim zrakom i rad krajnjih potrošačkih uređaja. Osim toga, iskorištenje otpadne topline iz kompresora i vraćanje iste kao sekundarnog izvora energije u proizvodnom procesu za zagrijavanje vode u sustavu grijanja jedna je od metoda kao i, optimizacija i redovito održavanje kompresorskih uređaja i sprječavanje neplaniranih gubitaka komprimiranog zraka [17].

Pri kontroli kvalitete komprimiranog zraka i pripremi istog za sustave s komprimiranim zrakom koriste se slijedeće vrste pomoćnih uređaja [12]:

1. Filtri za pročišćavanje ulaznog zraka koji čiste ulazni zrak od čestica iz atmosfere.
2. Sustavi hlađenja s obzirom kako kompresori i sustavi s komprimiranim zrakom proizvode velike količine otpadne topline jer su u stalnoj uporabi u industrijskim pogonima.
3. Sustavi među-hlađenja ukoliko se u proizvodnom procesu koristi višestupanjska kompresija.
4. Sustavi završnog hlađenja kako bi se snizila temperatura izlaznog komprimiranog zraka.
5. Sustavi sušenja zraka i sustavi za uklanjanje suviška vlage u zraku.

Veliki potrošački sustavi zahtijevaju i uporabu kompresora velikog kapaciteta i velike jedinice za sušenje zraka. U industrijskim postrojenjima se koriste različite vrste jedinica za sušenje zraka potrebnog za pravilan rad kompresora i sustava s komprimiranim zrakom. To su kontinuirani rashladni uređaj za sušenje zraka, diskontinuirani uređaj za sušenje zraka, regenerativni uređaj za sušenje zraka, sušionici s ugrađenom membranom, itd. [12]. Komprimirani zrak generiran kompresorom pohranjuje se u spremniku dovoljnog kapaciteta, kako bi se ublažile promjene u opskrbi komprimiranog zraka u odnosu na potražnju pojedinačnih potrošačkih uređaja u proizvodnom procesu. Spremnik također sudjeluje u hlađenju i odvlaživanju komprimiranog zraka, čime se smanjuju eventualna oštećenja i korozije pneumatskih sustava. Filteri za pročišćavanje zraka uklanjaju čestice prljavštine i kondenzirane vlage iz atmosfere nakon prolaska zraka kroz sustave hlađenja. S obzirom da kompresorske jedinice u sustavi s komprimiranim zrakom proizvode velike količine otpadne topline, ta se otpadna toplina može ponovno iskoristiti kao energija za zagrijavanje drugih energenata, primjerice za dogrijavanje vode koja ulazi u industrijske bojlere i za uređaje za proizvodnju tehnološke pare. Čak 80 % električne energije kojom se napaja kompresor se gubi u vidu

toplinske energije, a ta se toplina može ponovno vratiti kao pogonska energija za rad drugih jedinica u proizvodnom procesu (regeneracija i povrat energije). Vrući zrak se također ponovno može iskoristiti za grijanje prostora u sustavima klimatizacije, u sušionicima, za predgrijavanje zraka i predgrijavanje vode pomoću izmjenjivača topline te njeno korištenje za bojlere, sustave centralnog grijanja, toplinske pumpe, kemijsko čišćenje i praonice.

Treća vrsta pomoćnih uređaja koji se koriste u sustavima s komprimiranim zrakom su spremnici. U njima se pohranjuje zrak koji se može koristiti u slučaju povećanih proizvodnih kapaciteta tijekom proizvodnje. Njihova sekundarna namjena je kontrola tlaka zraka i njegovih eventualnih oscilacija u sustavu. Uz sustave filtriranja i sušenja, oni također sudjeluju u dodatnom hlađenju i odvlaživanju zraka. U kontroli kvalitete zraka za sustave s komprimiranim zrakom i kompresore još sudjeluju i drenažni uređaji (ventili i rezervoari) čija je primarna namjena odvođenje stvorenog kondenzata [12].

Velika postrojenja za ispredanje vlakana i proizvodnju tkanina (tkanje i predenje) koriste više od 15 % komprimiranog zraka u ukupnoj energetskoj potrošnji. Također se velike količine komprimiranog zraka koriste pri obradama vlakana, pređa i tkanina, što uključuje procese sušenja nakon bojadisanja, tiska i površinske obrade. Kompresori se također koriste pri uređajima za glačanje gotovih odjevnih predmeta, kao što su preše pri završnoj obradi sakoa, hlača i ostalih odjevnih predmeta za široku uporabu. U tvornici za proizvodnju odjeće, kompresori se najčešće koriste i za uređaje za međufazno glačanje, sustave transporta robe i sve pneumatske uređaje.

Komprimirani zrak se koristi za umećanje potke u uređajima za tkanje zračnim mlazom. Pri tome je efikasnost konverzije pri proizvodnji komprimiranog zraka relativno mala i samo se 15 % energije može efikasno

iskoristiti. Za bolje iskorištenje energije, toplinski gubici se mogu iskoristiti prethodno spomenutim postupcima povrata topline u takvoj tekstilnoj tvornici [14]. S obzirom kako većina tekstilnih tvrtki za proizvodnju pređa i tkanina koristi velike količine komprimiranog zraka, povrat topline i povećana energetska učinkovitost ima pozitivnu ekonomsku računicu. Kako su veliki tkalački strojevi najveći energetska potrošači u tvornici za proizvodnju tkanina i pridonose čak 50 do 60 % od ukupne energetske potrošnje, optimizacija sustava s komprimiranim zrakom je od presudne važnosti za smanjenje potrošnje energije [14].

U današnje vrijeme je iznimno široka primjena sustava toplinskih pumpi. Njihova primjena je najveća u uredskim prostorima, hotelima, rashladnim sustavima i industrijskim postrojenjima, kao što su i tekstilne tvornice. Toplinske pumpe se pri tome koriste ne samo za grijanje i ventilaciju zraka, nego i u proizvodnji tople vode i za predgrijavanje vode za napajanje kotlova [18]. Pri procjeni energetske učinkovitosti sustava toplinskih pumpi, čiji je glavni izvor zrak, uočeno je mogućnost energetske poboljšanja. Energetski proračuni sugeriraju potencijalna energetska poboljšanja u mnogim jedinicama, primjerice u kondenzatoru, kompresoru, evaporatoru i ekspanderu. Kako kompresorska snaga uvelike ovisi o tlaku upuha i ispuha, bilo kakva energetska poboljšanja u izmjenjivaču topline, kojima se smanjuje temperaturna razlika, istovremeno će rezultirati kompresorsku snagu postepenim izjednačavanjem temperatura kondenzacije i evaporacije. Naravno, energetska ireverzibilnost kompresora se može smanjiti i zasebnim poboljšanjima u samom kompresoru, posebice ukoliko se umjesto klipnih kompresora primijeni vijčani kompresor [18]. Efikasnijim iskorištenjem energije, uključujući i povrat otpadne topline i primjenu obnovljivih izvora energije, može se smanjiti emisija ugljikovog dioksida u atmosferi i smanjiti utjecaj

globalnog zatopljenja. Energetski učinkovite toplinske pumpe s optimiziranim djelovanjem mogu pomoći ostvarenju toga cilja, jer se njihovom uporabom stvara dovoljno toplinske energije, koja se može efikasnije iskoristiti u industrijskim postrojenjima umjesto financijski skuplje električne energije. Uporaba toplinskih pumpi je pogodnija i češće primijenjena u većini industrijskih pogona zbog njihovog efikasnijeg iskorištenja u odnosu na klasične sustave za grijanje i hlađenje pogona [18].

No, statistika korištenja toplinskih pumpi za povrat otpadne i procesne topline je još uvijek nezadovoljavajuća, posebno u Kanadi gdje samo 7,7 % industrijskih postrojenja koristi toplinske pumpe za povrat toplinske energije, gdje su uključene i tekstilne tvornice. Takva je statistika posljedica relativno niske cijene prirodnog plina i nafte u odnosu na relativno velike troškove uporabe električne energije koja se pri tome troši. Osim toga, tradicionalno se više pažnje u prošlosti posvećivalo problematici kvalitete proizvoda i pitanjima zagađenja okoliša nego ekonomskoj i energetske isplativosti korištenja toplinskih pumpi u industrijskim postrojenjima. Primjena toplinskih pumpi za postizanje visokih temperatura pokazuje velike potencijale u prehrambenoj, kemijskoj i tekstilnoj industriji, posebice pri proizvodnji polietilena i gume [17].

Sušenje je energetski intenzivan postupak kojim se troši između 9 do 25 % ukupne energije na nacionalnoj razini u zemljama u razvoju. Proces sušenje može zauzimati do 50 % energetske potrošnje pri doradi tekstilnih tkanina. Jedan od glavnih zadataka pri smanjenju energetske potrošnje u industrijskim postrojenjima u svijetu je vezan uz procese sušenja kroz poboljšanje energetske učinkovitosti opreme koja se pri tome koristi, posebice u pokušajima smanjenja energetske gubitaka pri propuhivanju vlažnog zraka jer ti postupci sačinjavaju čak 85 % svih procesa u velikim sušarama. To se postiže korište-

njem sušara sa subkritičnim mehaničkim toplinskim pumpama za kompresiju vodene pare [17].

Velike mogućnosti povrata otpadne topline moguće su iskorištenjem zagrijanog komprimiranog zraka pri sušenju tkanih najlonskih mreža i u tvornicama za proizvodnju ostalog tehničkog tekstila. Osim toga, velike količine komprimiranog zraka koriste se pri proizvodnji sintetičkih vlakana kao što je ispređanje poliesterskih, poliamidnih i polipropilenskih vlakana. U preradi prirodnih vlakana, velike količine komprimiranog zraka se koriste u procesima teksturiranja. Kod procesa teksturiranja, komprimirani zrak se koristi kako bi se poboljšala svojstva filamenata poput toplinskih svojstava, elastičnosti i volumena [14]. Jedan od primjera je kada se polimerna tekućina pomoću pumpe potiskuje kroz uske otvore mlaznice (ekstruzija) u medij za skrućivanje. Za teksturiranje, pređe se miješaju pomoću mlaznog zraka kroz mlaznicu. Najnovija tehnologija u sušioniku za sušenje zraka nudi cjelovito rješenje za čišćenje i sušenje zraka od onečišćenja u vidu čestica ulja i vlage. Koascilirajući filtri (načinjeni od borosilikatnih staklenih mikrovlakana) osiguravaju maksimalno uklanjanje ulja i vlage do 0,3 μm [19].

Velika industrijska postrojenja za proizvodnju sintetskih tekstilnih vlakana, također koriste velike količine komprimiranog zraka u sustavima sušionika. To se također odnosi i na sustave kontaktnog sušenja pri proizvodnji pamučnih tkanina, koje se tijekom procesa izbjeljivanja suše kako bi se formirao njihov konačan oblik, te potrebne dimenzije, posebice širina namotka.

Sekundarna uporaba komprimiranog zraka je vidljiva u sustavima klimatizacije i grijanja u postrojenjima tekstilne i odjevne industrije. Kompresori komprimiraju rashladni medij nižeg tlaka isparavanja na viši tlak kondenzacije u takvim velikim rashladnim i ventilacijskim sustavima [20].

Očuvanje energije u tekstilnoj industriji i smanjenje troškove postiže se

između ostaloga smanjenjem procesne vode, ali sniženjem emisije plinova iz kotla i termoelektrana. Drugi način smanjenja troškova i očuvanja energije u tekstilnoj industriji postiže se optimiziranjem komprimiranog zraka i smanjenjem generatorskog tlaka za 10 % što će omogućiti smanjenje godišnjih operativnih troškova kompresora za 5 %. Svaka dva do tri mjeseca trebala bi se provoditi kontrola eventualnih gubitaka zraka u sustavima s komprimiranim zrakom i kompresorima. Očuvanje energije u industrijskim postrojenjima tekstilne industrije moguće je putem kontrole temperature zraka koji ulazi u kompresor i osiguravanje njegove najniže moguće temperature jer smanjenjem temperature zraka na ulazu u kompresor za 4 stupnja, omogućava 1 % veću učinkovitost proizvodnog procesa. Uporaba kompresora adekvatnog kapaciteta je također od presudne važnosti, jer nije ekonomski isplativo koristiti kompresore prevelikih kapaciteta koji onda rade pri niskim opterećenjima. Stoga se u tekstilnoj industriji najčešće koriste klipni kompresori.

Smanjenje troškova hlađenje pojedinih uređaja i cjelokupnog tekstilnog pogona je također od iznimne važnosti. Kako bi se to postiglo, valja redovito kontrolirati učinkovitost i rad ekspanzijskih ventila, jer njihovim neadekvatnim radom nastaju čak 30 % veći troškovi [21].

U svakoj tekstilnoj tvornici optimizacija troškova uključuje kontrolu gubitaka kako vodene pare, tako i procesne vode, kondenzata i komprimiranog zraka. U Bangladešu tekstilne tvornice proizvode primjerice 1282 do 3007 m³ komprimiranog zraka po toni proizvedene tkanine [22].

Svaka tekstilna tvornica obično proizvodi više komprimiranog zraka nego je to potrebno kako bi se osigurali visoki tlakovi. S obzirom kako svaki uređaj zahtijeva specifičnu vrijednost tlaka zraka, optimizacija sustava s komprimiranim zrakom je od presudne važnosti. To se može postići kalibriranjem izlaznog tlaka zraka

u uređajima za generiranje komprimiranog zraka i osiguravanje optimalnog tlaka zraka za svaki pojedini potrošački uređaj. Takva je kontrola i diversifikacija moguća ugradnjom decentraliziranog sustava za generiranje komprimiranog zraka. Drugi način optimizacije troškova i potreba za komprimiranim zrakom, ovisi o potrebnom broju kompresora za normalno funkcioniranje uređaja u tekstilnoj tvornici [22].

4. Zaključak

Tekstilna industrija je jedan od najvećih potrošača komprimiranog zraka potrebnog za rad velikog broja strojeva, što u procesima međufaznog glačanja i dorade u proizvodnji odjeće, kako za proizvodnju sintetskih vlakana, te procese tkanja i pređenja pri proizvodnji tkanina. Osim toga velike se količine komprimiranog zraka koriste prilikom bojadisanja i sušenja u tvornicama za proizvodnju tkanina.

Analizom je utvrđeno kako su najčešći uzroci energetske gubitaka u tekstilnoj industriji pri primjeni sustava s komprimiranim zrakom posljedica nezadovoljavajuće kontrole i održavanja kompresora, gubitka tlaka pri prenošenju i distribuciji zraka unutar sustava i prema potrošačima. Osim toga neplanirani gubici komprimiranog zraka prisutni su kod distribucije do potrošačkih uređaja ili u sustavu za proizvodnju komprimiranog zraka, nepredviđena kondenzacija unutar smjese, nezadovoljavajuća kvaliteta zraka koji struji kroz sustave s komprimiranim zrakom uslijed promjene tlaka zraka, nedozvoljavajuće razine vlage u zraku, onečišćenja zraka, itd. Nadalje uporaba previsokih vrijednosti tlaka zraka za potrebe sustava s komprimiranim zrakom ili potrošačkih uređaja, i neadekvatno održavanje sustava, dovodi do energetske gubitaka.

Redovito praćenje kvalitete zraka u sustavima s komprimiranim zrakom i redovito održavanje takvih sustava, omogućit će najveće energetske uštede u tekstilnoj industriji. Energetske

i financijske uštede posljedica su redovitog obnavljanja instalacija za napajanje sustava s komprimiranim zrakom, optimizacije i redovitog održavanja kompresorskih uređaja i sprječavanja neplaniranih gubitaka komprimiranog zraka. Potrebna je redovita zamjena kompresora i nabava suvremenijih sustava s komprimiranim zrakom te redovito održavanje ostalih jedinica u proizvodnom pogonu u bliskom doticaju s kompresorskom jedinicom. Iskorištenje otpadne topline iz kompresora i vraćanje te topline kao sekundarnog izvora energije u proizvodnom procesu koristi se u sustavima grijanja vode. S obzirom da se čak 80 % električne energije dovedene kompresoru gubi u vidu toplinske energije, ta se toplina može ponovno vratiti u proizvodni proces kao pogonska energija za rad drugih jedinica postupcima regeneracije i povrata energije, čime se postiže viša energetska učinkovitost.

Literatura:

- [1] Budin R., Mihelić–Bogdanić A.: Izvori i gospodarenje energijom u industriji. Element, Zagreb, Hrvatska, 2014, ISBN: 978-953-197-672-5
- [2] Nikolić G.: Osnove automatizacije strojeva za proizvodnju odjeće, Udžbenici Sveučilišta u Zagreb, Tekstilno-tehnološki fakultet, Zagreb, Hrvatska, 2001, ISBN: 953-155-056-5.
- [3] Mirković R.: Pneumatika: uvod s primerima upravljanja, Mikro knjiga, Srbija, 2015, ISBN: 78-86-7555-405-9
- [4] Fabris O., Grljušić M.: Kompresori, Udžbenici Sveučilišta u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu, Split, Hrvatska, 2010
- [5] Budin R., Mihelić–Bogdanić A.: Osnove tehničke termodinamike. Školska knjiga, Zagreb, Hrvatska, 2012, ISBN: 978-953-0-31688-1
- [6] www.riteh.uniri.hr (pristupljeno 07.01.2018.)
- [7] www.pfri.uniri.hr (pristupljeno 04.01.2018.)
- [8] Barber A.: Pneumatic Handbook, 8th edition, Elsevier Science &

- Technology Books, Elsevier Ltd., 1997, ISBN: 9781856172493
- [9] Bupić M., Čustović S.: Stanje i trendovi uporabe dizalica topline, *Naše more* 53 (2006) 5-6, 213-219
- [10] Soldo V.: Mogućnost suradnje između istraživačkih institucija i poduzeća u razvijanju i korištenju tehnologija s područja OIE, *Dizalice topline*, (2013.) Radionica u okviru projekta IR – OVE, Čakovec, https://www.menea.hr/wp-content/uploads/2013/12/Dizalice-topline-CK_Soldo.pdf
- [11] Begović M.: Održavanje nazivnih performansi plinske turbine pri povišenim temperaturama okoliša, *Journal of Energy* 58 (2009) 2, 192-207
- [12] *Improving Compressed Air System Performance*, a sourcebook for industry, 3rd edition (2003) USA: U.S. Department of Energy
- [13] Rastgar I.: *Compressed Air: A key utility in textile industry*, Pakistan Textile Journal (2015) December, 28
- [14] Hasanbeigi A.: *Energy-Efficiency Improvement Opportunities for the Textile Industry*. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, 2010
- [15] Bloc, H. P., Soares, C.: *Turboexpanders and Process Applications*, 1st edition, Massachusetts, Butterworth-Heinemann, USA, 2001, ISBN: 0-88415-509-9
- [16] Mohd Fadzil N.A., Ab. Rahim M.H., Maniam G.P.: A brief review of paraxylene oxidation to terephthalic acid as a model of primary C-H bond activation, *Chinese Journal of Catalysis* 35 (2014) 1641-1652
- [17] *Assessment of the market for compressed air efficiency services*. U.S. Department of Energy, Office of industrial technologies, USA, 2001
- [18] Dincer I., Rosen. M.A.: *Exergy: Energy, Environment and sustainable development*, 2nd edition, Elsevier Ltd., Boca Raton, USA, 2013, ISBN 978-00804452-98
- [19] www.tridentpneumatics.com (pristupljeno 20.01.2018)
- [20] Wang S.K.: *Handbook of air conditioning and refrigeration*. 2nd edition. McGraw-Hill Inc., USA, 2000, ISBN: 0-07-068167-8
- [21] Barclay S., Buckley C.: *Waste Minimisation Guide for the Textile Industry: A Step Towards Cleaner Production*, Volume 1. University of Natal, The Pollution Research Group, Durban, South Africa, 2000
- [22] Kar A., Keane S. E., Greer L.: *Best practices for textile mills to save money and reduce pollution, Bangladesh: A practical guide for responsible sourcing*, The Natural Resources Defense Council (NRDC) and the World Bank, 2012.

SUMMARY**The possibilities of optimizing the compression and expansion processes in the textile industry***I. Špelić¹, A. Mihelić Bogdanić², I. Dorotić*

The paper analyses the possibilities of implementation and optimization of the compression and expansion processes in textile industry, mainly seen through application in the spinning process, dyeing process, dry cleaning and texturizing processes, the processing water cooling and pneumatics facilitating, or respectively pneumatic controls facilitating. The textile plant cost optimization includes both the control of the water vapour consumption, as well as the consumption control of the processing water, the condensate and the compressed air. The textile plant often produces more compressed air than actually needed to ensure adequate air pressure required for the operation of the end – using equipment. It must be noted that optimization of systems with compressed air is of outmost importance in order to meet air pressure requirements for specific end uses. This is accomplished by calibrating the outlet pressure levels for devices generating the compressed air and to ensure the optimum pressure level for every end – using component.

Key words: optimization of the compression and expansion processes, textile industry, cost optimization, compressed air

University of Zagreb Faculty of Textile Technology

¹*Department of Clothing Technology*

²*Department of Fundamental Natural and Engineering Sciences*

Zagreb, Croatia

e-mail: ispelic@ttf.hr

Received January 26, 2018

Die Möglichkeiten zur Optimierung der Kompressions- und Expansionsprozesse in der Textilindustrie

In dieser Arbeit werden die Umsetzungsmöglichkeiten und die Optimierung der Kompressions- und Expansionsprozesse in der Textilindustrie untersucht, wie Spinnen, Färben, Chemischreinigung, Texturierung und Kühlung des Prozesswassers und der Pneumatik bzw. pneumatische Steuerung. Die Kostoptimierung des Textilbetriebs umfasst sowohl die Kontrolle des Wasserdampfverlustes als auch des Prozesswassers, des Kondensats und der Druckluft. Die Textilfabrik erzeugt oft mehr Druckluft als tatsächlich benötigt, um ausreichend Drücke benötigt für den Betrieb der Verbraucheranlagen zu gewährleisten. Es ist darauf hinzuweisen, dass Optimierung von Systemen mit Druckluft von äußerster Wichtigkeit ist, weil jede Verbraucheanlage einen spezifischen Wert des Luftdrucks benötigt. Dies erfolgt durch die Kalibrierung des Ausgangsluftdrucks in Vorrichtungen zur Erzeugung von Druckluft und die Sicherstellung des optimalen Luftdrucks für jede einzelne Verbraucheanlage.