

UNIVERZA V LJUBLJANI
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA

DIPLOMSKO DELO

RENATO KOZJAK

LJUBLJANA, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI
NARAVOSLOVNOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA GEOTEHNOLOGIJO IN RUDARSTVO

OSKRBA S KOMPRIMIRANIM ZRAKOM V PODZEMNIH OBJEKTIH

DIPLOMSKO DELO

RENATO KOZJAK

LJUBLJANA, junij 2016

UNIVERSITY OF LJUBLJANA
FACULTY OF NATURAL SCIENCES AND ENGINEERING
DEPARTMENT OF GEOTECHNOLOGY, MINING AND ENVIRONMENT

SUPPLY OF COMPRESSED AIR IN UNDERGROUND FACILITIES

THESIS

RENATO KOZJAK

LJUBLJANA, junij 2016

PODATKI O DIPLOMSKEM DELU

Število listov: 57

Število strani: 57

Število slik: 63

Število preglednic: /

Število literaturnih virov: 8

Število prilog: /

Študijski program:

GEOTEHNOLOGIJA IN RUDARSTVO, VISOKOŠOLSKI STROKOVNI
PROGRAM

Komisija za zagovor diplomskega dela:

Predsednik: izr. prof. dr. Evgen Dervarič

Mentor: doc. dr. Željko Vukelić

Član: doc. dr. Goran Vižintin

Somentor: /

Ljubljana,

ZAHVALA

Zahvale za pomoč pri izdelavi diplomskega dela gredo predvsem mentorju, doc. dr. Željku Vukeliću za strokovno svetovanje ter pomoč pri izdelavi diplomske naloge. Prav tako se zahvaljujem g. Gregu Železniku, dipl. inž. strojništva, ki me je usmerjal pri izdelavi diplomskega dela v podjetju Premogovnik Velenje.

Zahvala gre tudi vsem domačim, predvsem staršema, ki sta mi omogočila študij ter me podpirala in spodbujala pri celotnem študiju in izdelavi diplomskega dela.

Povzetek (OSKRBA S KOMPRIMIRANIM ZRAKOM V PODZEMNIH OBJEKTIH)

Zračni pogon strojev in naprav je postal nenadomestljiv, prav tako pa se stalno povečuje tudi območje uporabnosti komprimiranega zraka v vseh vejah industrije. Čeprav je komprimiran zrak draga oblike energije, si proizvodnje v podzemnih prostorih brez komprimiranega zraka ne znamo predstavljati. Zaradi neomejenih količin zraka in enostavne dobave na velikih razdaljah se v podzemnih prostorih za napredovanje in urejanje delovišč uporablja veliko število strojev in naprav na komprimiran zrak. Velika uporabnost je predvsem zaradi nezahtevnosti in vzdržljivosti pnevmatskih naprav.

V nalogi so predstavljene teoretične osnove, način priprave komprimiranega zraka, posamezni sestavni elementi, ki so potrebni za dovod komprimiranega zraka od kompresorske postaje do končnih porabnikov v jamskih prostorih, vrste orodij in naprav, ki se uporabljajo v jamskih prostorih. Osredotočenost je namenjena dovodu in oskrbi komprimiranega zraka v podzemnih prostorih podjetja Premogovnik Velenje. Specifika podjetja zahteva, da se v jamskih prostorih uporabljajo samo stroji in naprave na električni in pnevmatski pogon, saj so prisotni plini, predvsem eksplozijsko nevaren metan, kar lahko v primeru preskoka iskre privede do eksplozije in požara.

V Premogovniku Velenje je velika pozornost namenjena tudi spremljanju porabe komprimiranega zraka in odpravljanju izgub, saj se s tem veliko pripomore k učinkovitosti in uresničevanju zastavljenih ciljev podjetja.

Abstract (SUPPLY OF COMPRESSED AIR IN UNDERGROUND FACILITIES)

Air drive machinery has become irreplaceable and the use of compressed air in all branches of industry is constantly increasing. The compressed air is an expensive form of energy, but manufacturing in underground facilities cannot be imagined without it. For promotion and regulation of yards in the underground facilities a lot of compressed air machines and devices are being used because of unlimited volume of air and easy delivery over long distances. There is a great usability, mostly because of pneumatic devices, which are unpretentious and durable. Thesis presents theoretical basics, the method of compressed air preparation, individual components, that are necessary for the compressed air supply from compressor station to the final consumers in the underground facilities, and different kinds of tools and devices used in the underground facilities. The focus is on the compressed air supply in the underground facilities of Premogovnik Velenje. The specifics of the company requests only the use of electrical and pneumatic devices in the underground facilities, because there are dangerous gases, mostly methan, so a flashover can cause an explosion and fire.

In Premogovnik Velenje there is a lot of attention in the monitoring of the compressed air consumption and in the elimination of losses, which contributes to the efficiency and reaching the strategic goals of the company.

KAZALO

1 UVOD	1
2 FIZIKALNE OSNOVE KOMPRIMIRANEGA ZRAKA	2
2.1 OSNOVE TERMODINAMIKE	2
2.2 PRVI ZAKON TERMODINAMIKE	3
2.2.1 Plinski zakoni	3
2.2.2 Preobrazbe idealnih plinov	4
2.2.3 Proces kompresije in ekspanzije	9
3 PRIDOBIVANJE KOMPRIMIRANEGA ZRAKA	13
3.1 PREDNOSTI IN SLABOSTI KOMPRIMIRANEGA ZRAKA	13
3.1.1 Prednosti	13
3.1.2 Slabosti	13
3.2 NAČINI PRIDOBIVANJA KOMPRIMIRANEGA ZRAKA	14
3.3 DELITEV KOMPRESORJEV	14
3.3.1 Batni kompresorji	15
3.3.2 Rotacijski kompresorji	17
3.3.3 Ejektorji	18
3.3.4 Turbokompresorji	18
3.4 SISTEM ZA KOMPRIMIRAN ZRAK	19
4 KOMPRESORSKA POSTAJA	21
4.1 LOKACIJA IN VELIKOST PROSTORA KOMPRESORSKE POSTAJE	21
4.3 GLAVNI IN DISTRIBUCIJSKI RAZVOD	22
4.3.1 Dimenzioniranje glavnega in distribucijskega razvodnega omrežja	22
4.3.2 Odvajanje kondenzata iz omrežja	23
4.3.3 Filtriranje komprimiranega zraka	24
4.3.4 Sušenje komprimiranega zraka – sušilniki	24
4.3.5 Ciklonski izločevalnik kondenzata	25
4.3.6 Tlačna posoda	25
4.3.7 Regulator tlaka	26
4.3.8 Separatorji voda-olje	26
4.4 IZGUBE KOMPRIMIRANEGA ZRAKA	27
4.4.1 Mesta in vrste izgub	27
4.4.2 Tlačne izgube	27
4.4.3 Puščanje	28
5 PROIZVODNJA IN DISTRIBUCIJA KOMPRIMIRANEGA ZRAKA – PREMOGOVNIK VELENJE	29
5.1 KOMPRESORSKA POSTAJA NOP	29
5.1.1 Konstrukcija KAESER kompresorja	30
5.1.2 Centralni računalnik – Sam 8	31
5.1.3 Električno krmiljene žaluzije	31
5.1.4 Sušilniki KAESER	32
5.1.5 Tlačna posoda	32
5.2 PREGLED PORABE IN STROŠKOV KOMPRIMIRANEGA ZRAKA V PREMOGOVNIKU VELENJE	33
5.2.1 Stroški rednega vzdrževanja kompresorske postaje NOP	34
6 VARNOSTNO-TEHNOLOŠKI INFORMACIJSKI SISTEM	35

7 DOVOD IN OSKRBA KOMPRIMIRANEGA ZRAKA DO KONČNIH PORABNIKOV V JAMI.....	36
7.1 VRSTE IN MONTAŽA CEVI.....	36
7.2 KONTROLA TESNOSTI.....	36
7.3 GIBLJIVE CEVI MANTEX	37
7.4 VTIČNICA SKLOPNEGA PRIKLJUČKA.....	37
7.5 NEPOVRATNI VENTILI.....	37
7.6 PRIPRAVNA GRUPA	38
8 PORABNIKI KOMPRIMIRANEGA ZRAKA V JAMI	39
8.1 PNEVMATSKI STROJI IN NAPRAVE	39
8.1.1 Udarni strojček za privijanje/odvijanje matic.....	39
8.1.2 Odkopna kladiva.....	39
8.1.3 Pnevmatске verižne žage	40
8.1.4 Vrtalna kladiva.....	40
8.1.5 Pnevmatška dvigala.....	40
8.1.6 Pnevmatški vrtalni stroji.....	41
8.1.7 Zabijalni aparati.....	41
8.1.8 Kotna brusilka.....	41
8.1.9 Škarje za rezanje pločevine	42
8.1.10 Ventilator VPAV-2-630	42
8.1.11 Pnevmatški nakladalec EIMCO 12B.....	42
9 ZAKLJUČEK	46
10 LITERATURA IN VIRI.....	47

KAZALO SLIK

Slika 1: Pretvorba električne energije v mehansko	1
Slika 2: Zaprti valj pri konstantnem volumnu	4
Slika 3: Izohorna sprememba	5
Slika 4: Izobarna sprememba	6
Slika 5: Izotermna sprememba	7
Slika 6: Adiabatsna preobrazba	8
Slika 7: Politropska preobrazba	9
Slika 8: Del krožnega procesa 1–2, adiabatsna kompresija	10
Slika 9: Del krožnega procesa 1–2–3, izobarna kompresija	11
Slika 10: Del krožnega procesa 1–2–3–4, adiabatsna ekspanzija	12
Slika 11: Zaključen krožni proces	12
Slika 12: Vrste kompresorjev	15
Slika 13: Enostopenjski, dvostopenjski in dvostranski batni kompresor	15
Slika 14: Prikaz delovanja batnega kompresorja	16
Slika 15: Vijačni kompresor	17
Slika 16: Lamelni kompresor	17
Slika 17: Rootsova puhala	18
Slika 18: Ejektor	18
Slika 19: Turbokompresor	18
Slika 20: Centrifugalni in aksialni kompresor	19
Slika 21: Tipična shema pridobivanja kakovostnega stisnjenega zraka	20
Slika 22: Kompresorska postaja	21
Slika 23: Glavni in distribucijski razvod	22
Slika 24: Princip delovanja kondenznega lončka	23
Slika 25: Potreben naklon cevi za odvajanje kondenzata	23
Slika 26: Prerez filtra z vložkom in izločevalnikom kondenzata	24
Slika 27: Ciklonski izločevalnik kondenzata	25
Slika 28: Tlačne posode	25
Slika 29: Regulator tlaka	26
Slika 30: Separator voda-olje	26
Slika 31: Tlačne izgube na določenem odseku cevovoda	27
Slika 32: Shematski prikaz KAESER kompresorja	30
Slika 33: Celovit prikaz kompresorske postaje NOP	31
Slika 34: Centralni računalnik Sam 8 (levo), odvajalec kondenzata ECO (desno)	31
Slika 35: Električno krmiljene žaluzije	32
Slika 36: Sušilniki KAESER	32
Slika 37: Tlačni posodi za kompresorsko postajo NOP	32
Slika 38: Pretok zraka NOP – jama v določenem časovnem obdobju	33

Slika 39: Tabela porabe in stroškov komprimiranega zraka v jami.....	34
Slika 40: Nadzorna soba PV	35
Slika 41: Prikaz spremljanja kompresorske postaje NOP v nadzorni sobi PV	35
Slika 42: ACME spojka.....	36
Slika 43: Priključitev strojčkov na razvod komprimiranega zraka s cevjo MANTEX.....	37
Slika 44: Priključna vtičnica in vtičnik sklopnega priključka	37
Slika 45: Nepovratni ventil.....	37
Slika 46: Pripravna grupa	38
Slika 47: Strojček za privijanje matic Atlas Copco	39
Slika 48: Odkopno kladivo	39
Slika 49: Pnevmatška žaga PD51	40
Slika 50: Vrtalno kladivo MFD90	40
Slika 51: PROFI M63D 3TI	40
Slika 52: Pnevmatški vrtalni stroj TURGMAN.....	41
Slika 53: Zabijalni aparat FASCO F26C 90-40.....	41
Slika 54: Kotna brusilka	41
Slika 55: Škarje za rezanje pločevine	42
Slika 56: Pnevmatški ventilator VPAV-2-630	42
Slika 57: Nakladalec EIMCO 12B	43
Slika 58: Prikaz uporabe dihalnika v primeru izbruha plina.....	43
Slika 59: Pnevmatški ranžirni vlak.....	43
Slika 60: Membranska potopna črpalka	44
Slika 61: Brizganje betona s strojem ALIVA	44
Slika 62: Pnevmatški cilinder za zračilne pregrade	45
Slika 63: Prikazana kretnica z visečo dizel lokomotivo	45

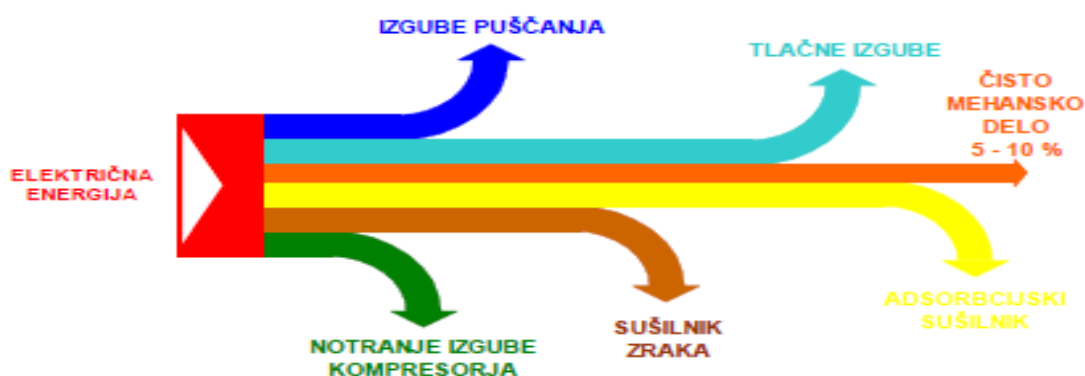
1 UVOD

Zrak je zmes plinov, ki sestavlja ozračje Zemlje. Je prozoren, neviden, brez barve, brez okusa in vonja. Zrak, ki ga vdihavamo, vsebuje približno 78 % dušika, več kot 20 % kisika, nekaj manj kot 1 % žlahtnih plinov (od teh največ argona, sledijo pa neon, helij in kripton), 0,033 % ogljikovega dioksida ter 0–7 % vodne pare.

Komprimiran zrak je praktično zaprt atmosferski tlak in ima možnost prenosa energije na določeni razdalji. Za pridobivanje komprimiranega zraka se uporabljajo naprave, ki jih imenujemo kompresorji, ki z vnesenim delom komprimirajo zrak na višje tlake. Atmosferski tlak (1 bar) lahko dvignejo na višji tlak, do 414 barov.

Ti procesi so določeni z zakoni termodinamike, ki pojasnjujejo, da so tlak, volumen in toplota sorazmerni med seboj. Energija komprimiranega zraka sodi med lažje obvladljive oblike energije; kot eden glavnih virov energije je komprimiran zrak vedno bolj pomemben in vedno bolj prisoten v vseh vejah industrije. Uporablja se ga predvsem kot nosilca energije ali kot proizvodno sredstvo. Je čist, varen, stisljiv, preprost, negorljiv, nevnetljiv in ne onesnažuje okolja.

Kot energija je v povprečju 50-krat dražji od zemeljskega plina in 10-krat dražji od elektrike. Energija komprimiranega zraka je draga predvsem zaradi notranjih izgub, tlačnih izgub in izgub zaradi puščanja. Zaradi vseh izgub se v čisto mehansko delo pretvori samo 5–10 % porabljene energije. Komprimiran zrak se uporablja skoraj pri vsaki proizvodnji: kovanju, vijačenju, poganjanju raznih orodij in naprav, aeraciji, za hlajenje, izpihovanje, transport, krmiljenje ventilov in naprav, razprševanje, čiščenje, napihovanje plastenk, v kemičnih in farmacevtskih industrijah, v podzemnih prostorih, za varnost ljudi v jami (dihalniki) ter za uporabo raznih pnevmatskih orodij in naprav.



Slika 1: Pretvorba električne energije v mehansko

2 FIZIKALNE OSNOVE KOMPRIMIRANEGA ZRAKA

2.1 OSNOVE TERMODINAMIKE

Termodinamika je veja fizike, ki se ukvarja z energetskimi spremembami sistemov in njihove okolice. Je proces, pri katerem sistem zaradi zunanjih vplivov preide iz enega ravnovesnega stanja v drugo. Pri termodinamični obravnavi se loči sistem od okolice, in sicer je sistem tisti del, ki ga proučujemo, okolica pa je vse, kar ni sistem.

2.1.1 Veličine stanja

Veličine stanja podajamo z določenimi fizikalnimi vrednostmi stanja sistema. Nekatere fizikalne veličine lahko merimo, druge pa lahko iz merljivih veličin izračunamo.

2.1.1.1 Volumen

Prostornina ali volumen (oznaka V) je fizikalna količina, ki pove, koliko prostora zaseda telo. Specifični volumen (v) je volumen, ki ga zavzema 1 kg telesa.

$$v = \frac{V}{m}; \text{ meri se v } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right]$$

2.1.1.2 Specifična masa ali gostota

Specifična masa katerekoli homogene snovi (trdo telo, plin ali para) je razmerje med maso telesa m in njegovo prostornino V .

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v}; \text{ meri se v } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$$

2.1.1.3 Tlak

Tlak ali pritisk (oznaka p) je razmerje med silo F , ki deluje pravokotno na podlago, in stično površino S med telesom in podlago. Tlak je tem večji, čim večja je pravokotna sila na podlago in čim manjša je stična površina.

$$p = \frac{F}{S} \left[\frac{1\text{N}}{\text{m}^2}\right]$$

Za navedbo tlaka pogosto uporabljamo večjo enoto $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2$

V praksi govorimo o absolutnem, zračnem in relativnem tlaku. Dejansko vrednost tlaka imenujemo absolutni tlak p . Zračni tlak p_a je tlak zaradi lastne teže zraka. Normalni zračni tlak znaša $p_a = 1013 \text{ mbar}$ in se meri z manometri.

Relativni tlak p_e je lahko podtlak ali nadtlak. Kadar je absolutni tlak manjši od zračnega tlaka, govorimo o podtlaku, če pa je absolutni tlak večji od zračnega, govorimo o nadtlaku.

$$\begin{aligned} p_e &= p - p_a > 0 \dots\dots \text{nadtlak} \\ p_e &= p - p_a < 0 \dots\dots \text{podtlak} \end{aligned}$$

2.1.1.4 Temperatura

Temperatura je ena od osnovnih termodinamičnih količin, s katero lahko opredelimo stanje snovi. Voda se pri dovajanju toplote pretvori v paro (zavre pri 100 °C), pri ohlajanju se spremeni v led pri 0 °C. Vsa tri agregatna stanja so posledica toplotnega procesa. Poleg najbolj uporabljene Celzijeve lestvice se uporablja tudi absolutna ali Kelvinova temperaturna lestvica.

$$T \text{ (K)} = T \text{ (°C)} + 273 \text{ K}$$

2.2 PRVI ZAKON TERMODINAMIKE

- Zakon pravi, da energija ne more nastati iz ničesar, niti ne more izginiti v nič, lahko pa se ena vrsta energije pretvori v drugo vrsto.
- Povečanje energije ene vrste povzroči zmanjšanje energije druge vrste.
- Zakon o ohranitvi energije pravi, da je vsota vseh energij, ki so v sistemu, konstantna.
- Sistem je del celote, ki ga obravnavamo, je kot prostor ali količina snovi, ki je omejena s stenami. Vse, kar je zunaj teh sten, torej izven sistema, je okolica.
- V splošnem ločimo različne termodinamične sisteme:
- odprte sisteme (preko meje sistema se izmenjuje tako snov kot energija), primer: motor z notranjim izgorevanjem;
- zaprte sisteme (sistem, ki z okolico ne izmenjuje snovi, možna je samo izmenjava energije), primer: segrevanje snovi v zaprti posodi;
- toplotno izolirane sisteme (sistem, kjer preko meje ne prehajata niti energija niti snov, primer: Adiabatsna kompresija v zaprti izolirani posodi.

2.2.1 Plinski zakoni

Plini so od vseh agregatnih stanj najpreprostejši. Te količine so povezane prek treh plinskih zakonov. Plinski zakoni so določene zveze med tlakom, prostornino in temperaturo plina in so med seboj odvisne količine:

- Boylov zakon povezuje prostornino in tlak idealnega plina pri izotermni spremembi, torej pri spremembi, ki poteka pri stalni temperaturi.
- Gay-Lussacov zakon povezuje prostornino in temperaturo idealnega plina pri izobarni spremembi, torej pri spremembi, ki poteka pri stalnem tlaku.
- Amontonsov zakon povezuje tlak in temperaturo idealnega plina pri izohorni spremembi, torej pri spremembi, ki poteka pri stalni prostornini.

Vsi trije zakoni so sestavljeni v splošen plinski zakon.

Plinska enačba povezuje tlak, volumen in temperaturo idealnega plina. Poznamo jo v dveh oblikah:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Druga oblika plinske enačbe je:

$$p \cdot V = N \cdot k \cdot T$$

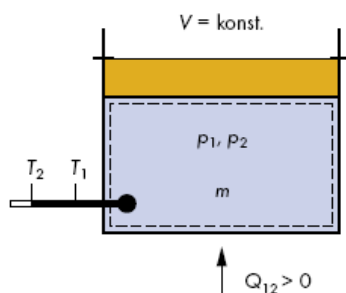
kjer je:

- p tlak plina z enoto [kPa]
- V volumen plina z enoto [L] [L]
- n množina plina z enoto [mol]
- T temperatura plina z enoto [K]
- n število kilomolov
- R splošna plinska konstanta ... $8,31 \frac{\text{kPa L}}{\text{mol K}}$ ali $8.31 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
- N število molekul
- k Boltzmanova konstanta

2.2.2 Preobrazbe idealnih plinov

2.2.2.1 Izohorne spremembe

Označujejo spremembo stanja pri konstantni prostornini. Primer zaprtega valja s kilomolom plina, ki ga segrevamo. Z dovajanjem toplote volumen ostane nespremenjen, povišata pa se temperatura in tlak. Spremembam pravimo izohorne spremembe. Količnik med tlakom in temperaturo ostaja med segrevanjem konstanten:



Slika 2: Zaprti valj pri konstantnem volumnu

$$\frac{p}{T} = \frac{p_1}{T_1} = K \rightarrow \dots \text{konstanta } K (371 \cdot 10^{-5}/K)$$

Plinska enačba za začetno in končno stanje

$$V = \text{konst.}$$

$$p_1 \cdot V = m \cdot R \cdot T_1$$

$$p_2 \cdot V = m \cdot R \cdot T_2$$

Amontonsov zakon pravi, da pri konstantnem volumnu in ob upoštevanju predpostavke idealnega plina velja:

$$\frac{p}{T} = \text{konst.} \Rightarrow \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \dots \text{Amontonsov zakon; } V = \text{konst.}$$

Pri izohorni preobrazbi idealnega plina sta si tlak in temperatura premosorazmerna. Zaradi konstantnega volumna absolutnega dela pri izohorni preobrazbi ni.

$$W_{12} = 0$$

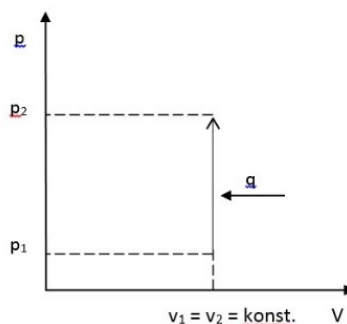
Tehnično delo = notranje delo:

$$W_t = - \int_{p_1}^{p_2} V \cdot dp = V \cdot (p_1 - p_2)$$

Dovedena toplota Q:

$$Q = m \cdot c_v \cdot [T_2 - T_1]$$

Specifična toplota: $R = c_p - c_v$



Slika 3: Izohorna sprememba

Specifična toplota nam pove, koliko toplote moramo dovesti 1 kg snovi, da jo segrejemo za 1 K. Specifično toplota označujemo s črko c in ima enoto J/(kg K).

2.2.2.2 Izobarne spremembe

To so spremembe stanja termodinamskega sistema, pri katerih se tlak ne spreminja, spreminjata pa se prostornina in temperatura.

Primer zaprtega valja, kjer valj segrevamo. Količnik med volumnom in temperaturo ostaja konstanten, kjer T in V določata stanje plina pred spremembo, T_1 in V_1 stanje plina po spremembi, K pa je konstanta. Za kilomol plina je $K = 8.22 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{K}$

Plinska enačba za začetno in končno stanje:

$$p * V_1 = m * R * T_1$$

$$p * V_2 = m * R * T_2$$

Iz tega sledi:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} ; p = \text{konst.}$$

Absolutno delo:

$$W_{12} = p * (V_2 - V_1) [J]$$

Tehnično delo (notranje delo):

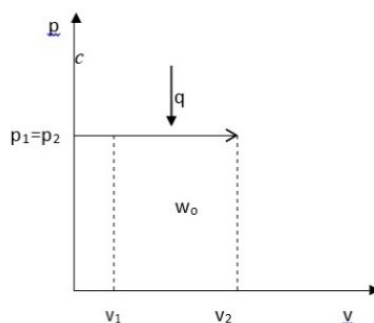
$$W_{12t} = 0$$

Toplota, ki jo dovajamo pri izobarni preobrazbi:

$$Q_{12} = m \cdot c_p(T_2 - T_1)$$

Iz energijskega zakona sledi:

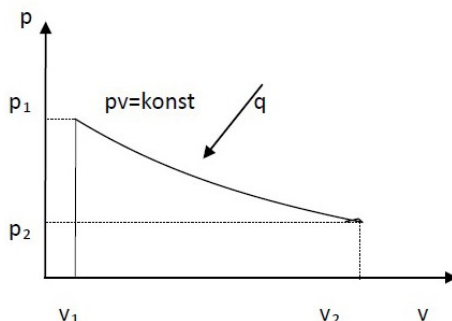
$$\Delta U = Q_{12} - W_{12} = m \cdot c_v(T_2 - T_1)$$



Slika 4: Izobarna sprememba

2.2.2.3 Izotermne spremembe

Ko bat stisnemo, se volumen plina zmanjša in tlak poveča. Opisujejo odvisnost tlaka in prostornine idealnega plina pri konstantni temperaturi.



Slika 5 Izotermna sprememba

Plinska enačba za začetno in končno stanje:

$$T = \text{konst.}$$

$$p_1 \cdot V_1 = m \cdot R \cdot T$$

$$p_2 \cdot V_2 = m \cdot R \cdot T, \text{ iz tega sledi:}$$

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

Boylov zakon pravi, da pri konstantni temperaturi in ob upoštevanju predpostavke idealnega plina velja:

$$p \cdot V = p_1 \cdot V_1, T = \text{konst.}$$

Pri izotermni preobrazbi se temperatura ne spreminja, zato se tudi notranja energija ne spreminja.

Notranja energija:

$$U_2 - U_1 = 0 = Q_{12} - W_{12} [\text{J}]$$

Tehnično delo:

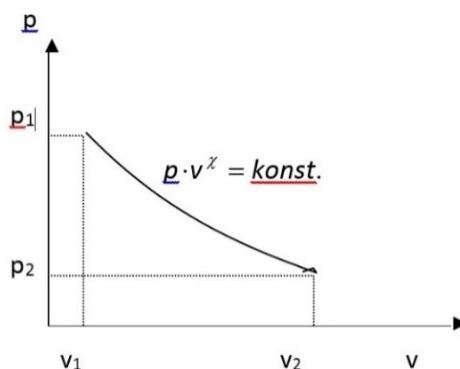
$$W_{12t} = W_{12} = m \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} [\text{J}]$$

Toplota:

$$Q_{12} = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} [\text{J}]$$

2.2.2.4 Adiatna preobrazba

Adiatna sprememba je sprememba stanja termodinamičnega sistema, pri kateri sistem ne oddaja nobene toplote okolici niti je ne prejme, spreminjajo pa se prostornina, temperatura in tlak. Je pretvorba brez izmenjave toplote $\rightarrow Q = 0$.



Slika 6: Adiatna preobrazba

Notranja energija:

$$du = c_v \cdot dT = c_v (T_1 - T_2)$$

Enačba adiabate:

$$p_1 \cdot v_1 = R \cdot T_1 \quad (\text{začetno stanje})$$

$$p_2 \cdot v_2 = R \cdot T_2 \quad (\text{končno stanje})$$

$$p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2 = R \cdot (T_1 - T_2)$$

$$d_u = c_v(T_1 - T_2) = c_v \frac{p_1 V_1 - p_2 V_2}{R} = \frac{1}{K - 1} p_1 V_1 - p_2 V_2$$

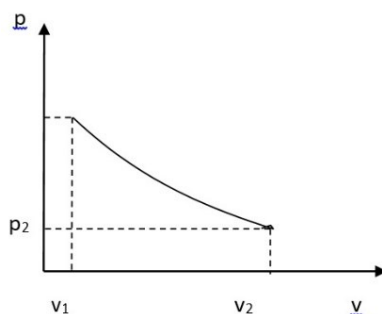
$$c_v = \frac{R}{K - 1}$$

$$p \cdot v^K = K = \text{konst.}$$

Adiabatna mora črpati energijo iz samega sistema. Za procese v naravi (izmenjava toplote z okolico) nam adiabatna ne koristi. Za te uporabimo politropske preobrazbe.

2.2.2.5 Politropska preobrazba

Ta preobrazba upošteva izmenjavo toplote z okolico (ne idealne razmere).



Slika 7: Politropska preobrazba

Enačba politrope:

$$p \cdot v^n = K = \text{konst.}$$

2.2.3 Proces kompresije in ekspanzije

S fizikalnimi osnovami bom opisal proces kompresije in ekspanzije ter izračunal termodinamični izkoristek med pridobljenim in vloženim delom. Termodinamični proces sem obravnaval tako, da se vse faze procesa odvijajo brez izgub.

Privzamem začetno stanje:

- Volumen $V_1 = 1 \text{ m}^3$ zraka pri normalnih pogojih
- Temperatura zraka $T_1 = 273 \text{ K}$
- Tlak $p_1 = 1.01 \text{ bar}$
- Gostota vsesanega zraka je s tem $p_1 = 1.29 \text{ kg/m}^3$
- Masa v procesu sodelujočega zraka $m = 1.29 \text{ kg}$

V nadaljevanju bom opisal naslednje termodinamične korake:

- 1 → 2: adiabatno kompresijo
- 2 → 3: izobarno kompresijo, $p = \text{konstanta}$, $T_2 \rightarrow T_3$
- 3 → 4: adiabatno ekspanzijo, $p_4 = p_1$
- 4 → 1: izobarno ekspanzijo, $p = \text{konstanta}$, $T_4 \rightarrow T_1$

Iz začetnega stanja, iz točke 1 s tlakom $p_1 = 1$ bar se opravi najprej adiabatna kompresija v točko 2, do tlaka $p_2 = 6.5$ bar. Kompresija ε je razmerje med tlakoma v točkah 1 in 2.

$$\varepsilon = \frac{p_2}{p_1} = \frac{6.5}{1} = 6.5$$

Po kompresiji se spremenita tudi volumen in temperatura, ki ju izračunamo po znanih relacijah za adiabatne spremembe.

Pri tem je:

$$K = \frac{c_p}{c_v} = 1.399$$

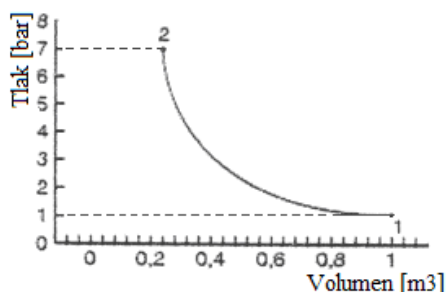
K je razmerje specifične toplote zraka pri konstantnem tlaku C_p in volumnu C_v za dvoatomne pline. $C_p = 1013$ J/kgK; $C_v = 724$ J/kgK.

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{\frac{K-1}{K}} = 273 * (6.5)^{0.285} = 465K$$

Izračun za volumen v točki 2:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{K}}$$

$$V_2 = 1 \left(\frac{1}{6.5} \right)^{\frac{1}{1.399}} = 0.262 m^3$$



Slika 8: Del krožnega procesa 1–2, adiabatna kompresija

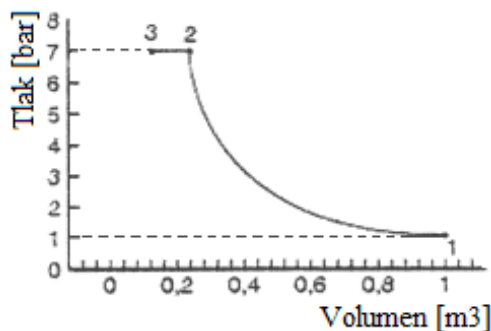
Po opravljeni kompresiji potuje zrak iz stanja točke 2 v stanje točke 3 tako, da ga pri konstantnem tlaku ohladimo na začetno temperaturo: $T_2 \rightarrow T_3 = T_1 = 273$ K.

Torej tlak ostane enak kot v točki 2, temperatura je enaka začetni. Iz tega izračunamo V_3 . Za izobarno ohlajanje iz točke 2 $\rightarrow$ 3 velja

$$\frac{V_3}{T_3} = \frac{V_2}{T_2}$$

Ker je $T_3 = T_1$, sledi:

$$V_3 = \frac{T_1}{T_2} V_2 = \frac{273}{465} \cdot 0,262 \text{ m}^3 = 0,154 \text{ m}^3$$



Slika 9: Del krožnega procesa 1–2–3, izobarna kompresija

Ker sem predpostavil proces brez snovnih in energetskih izgub zaradi trenja in uporov, lahko iz stanja 3 proces direktno nadaljujem z adiabatno ekspanzijo do stanja 4, ki je opredeljen s tlakom, ki je enak začetnemu $p_4 = p_1$. Izračunati moramo še V_4 in T_4 .

Za adiabatno ekspanzijo iz točke 3 $\rightarrow$ 4 pa velja:

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

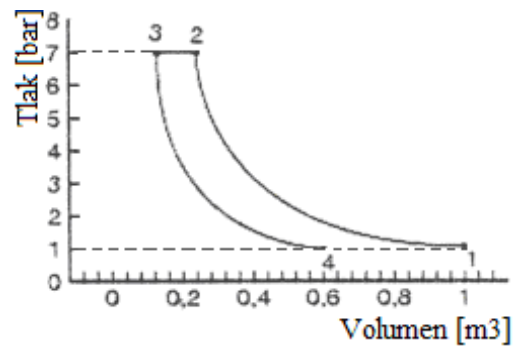
Ker je $T_3 = T_1$, $p_3 = p_2$ in $p_4 = p_1$, sledi:

$$T_4 = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 273 \left(\frac{1}{6.5} \right)^{0,285} = 160 \text{ K}$$

$$\frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{1}{k}}$$

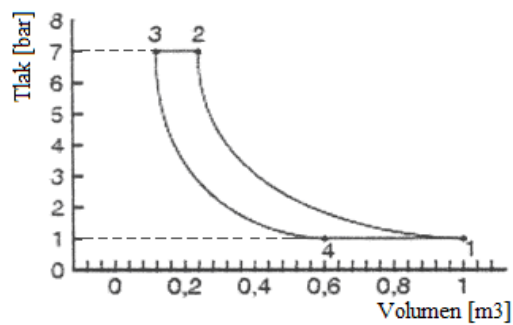
$$V_4 = V_3 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} = V_3 \epsilon^{\frac{1}{k}}$$

$$V_4 = 0,154 * \left(\frac{6.5}{1} \right)^{\frac{1}{1,399}} = 0,587 \text{ m}^3$$



Slika 10: Del krožnega procesa 1–2–3–4, adiabatna ekspanzija

Iz stanja 4 se proces krožno vrne v začetno stanje 1 tako, da se zrak pri konstantnem tlaku segreje na začetno temperaturo T_1 , torej $T_4 \rightarrow T_1$.



Slika 11: Zaključen krožni proces

V točki 1 je $p_1 = 1.01 \text{ bar}$, $V_1 = 1 \text{ m}^3$, $T_1 = 273 \text{ K}$.

V točki 2 je $p_2 = 6.5 \text{ bar}$, $V_2 = 0.262 \text{ m}^3$, $T_2 = 465 \text{ K}$.

V točki 3 je $p_3 = 6.5 \text{ bar}$, $V_3 = 0.154 \text{ m}^3$, $T_3 = T_1 = 273 \text{ K}$.

V točki 4 je $p_4 = 1.01 \text{ bar}$, $V_4 = 0.587 \text{ m}^3$, $T_4 = 160 \text{ K}$.

3 PRIDOBIVANJE KOMPRIMIRANEGA ZRAKA

Kompresorji so naprave, ki z vnesenim delom komprimirajo zrak na višje tlake. Komprimiran zrak se po cevovodih transportira do pnevmatičnih naprav. Atmosferski tlak (1 bar) lahko dvignejo na višji tlak, do 414 barov.

3.1 PREDNOSTI IN SLABOSTI KOMPRIMIRANEGA ZRAKA

3.1.1 Prednosti

- Shranjevanje: Enostavna akumulacija energije. Komprimiran zrak lahko shranjujemo v zbiralnih tlačnih posodah kot rezervo energije in ga po potrebi odvzemamo.
- Temperatura: Komprimiran zrak je neobčutljiv na zunanje temperaturne spremembe, kar zagotavlja zanesljivo delovanje naprav tudi pri ekstremnih temperaturnih pogojih.
- Transport: Komprimiran zrak lahko transportiramo po ceveh tudi na večje razdalje. Niso potrebni povratni vodi.
- Količina: Zraka je v neomejenih količinah povsod dovolj.
- Hitrost: Hiter delovni medij. Najgospodarnejše je izkoriščanje energije stisnjenega zraka v območju hitrosti od 1 do 2 m/s.
- Protieksplzijska varnost: Ni nevaren za nastanek eksplozije ali požara. Stroškov z varnostnimi ukrepi pred požarom ali eksplozijo ni.
- Čistost: Komprimiran zrak je čist medij. Dobimo ga iz ozračja in ga spremenjenega zopet vračamo.
- Enostavno vzdrževanje.

3.1.2 Slabosti

- Visoka cena te oblike energije.
- Zahteva zelo dobro pripravo.
- Zaradi stisljivosti zraka ne moremo dosegati enakomernih hitrosti, nenatančnost pozicioniranja.
- Deluje na nizkih delovnih tlakih, običajno 6 barov.
- Vsebuje vlago.
- Velike izgube zaradi puščanja na priključkih.
- Ne sme vsebovati nečistoče in vlage, kajti lahko pride do motenj v delovanju.
- Povzroča neprijetno akustično emisijo pri odzračevanju (sikanje).

3.2 NAČINI PRIDOBIVANJA KOMPRIMIRANEGA ZRAKA

V principu razlikujemo dva načina pridobivanja komprimiranega zraka:

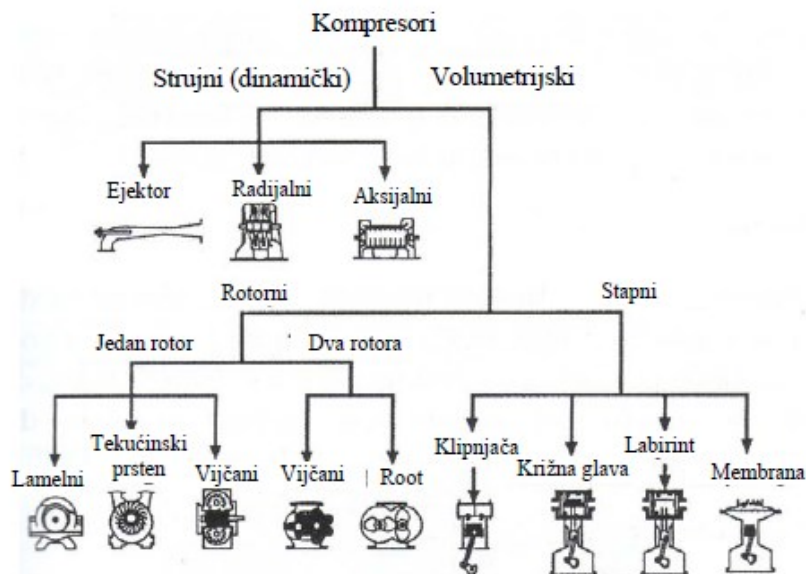
- z zmanjšanjem prostornine,
- s pospeševanjem zraka.

Pri prvem principu zmanjšujemo volumen prostora. Po tem principu delujejo batni kompresorji. Pri drugem principu se toku zraka pospešuje hitrost. Po tem principu delujejo turbokompresorji, ki so primerni za velike količine zraka.

3.3 DELITEV KOMPRESORJEV

Glede na način komprimiranja zraka delimo kompresorje na:

- **VOLUMETRIČNE KOMPRESORJE**
 - a) **KOMPRESORJI S PERIODIČNIM (IZMENIČNIM) DELOVANJEM**
 - batni
 - membranski
 - diafragme
 - b) **ROTACIJSKI KOMPRESORJI**
 - kompresorji z rotorjem
 - kompresorji z vodnim obročem
 - kompresorji s pomičnimi lopaticami
 - lamelni kompresorji
 - vijačni kompresorji
 - Rootsovi kompresorji
- **KOMPRESORJE S KONTINUIRANIM (DINAMIČNIM) DELOVANJEM**
 - aksialni turbokompresorji
 - radialni turbokompresorji
 - ejektorji

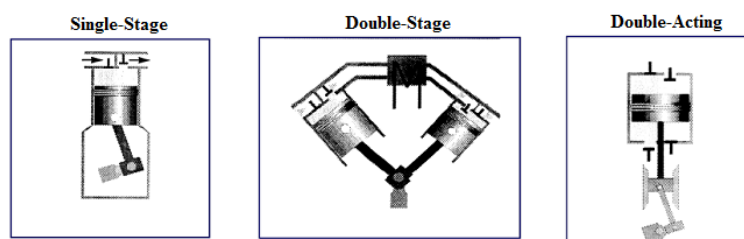


Slika 12: Vrste kompresorjev

3.3.1 Batni kompresorji

Do nedavnega so se najpogosteje uporabljali batni kompresorji. So edina oblika kompresorjev, ki omogoča stiskanje zraka na visoke tlake. Batni kompresorji delujejo med 0,75 kW in 420 kW in proizvajajo delovni tlak od 1,5 bara do 414 barov. Komprimiran zrak proizvajajo s pomočjo batov, kar je za današnje razmere drago in neekonomično. Slabosti batnih kompresorjev so hrupnost, močno gretje in niso primerni za neprekinjeno delovanje sistema. Uporabljajo se za stiskanje različnih plinov (zemeljski plin, dušik, bioplin), visokotlačno stiskanje zraka (dihalni zrak za potapljaške jeklenke, potresne geodetske meritve, tlačni preizkusi produktov), industrijo, zagon motorjev ...

Batne kompresorje delimo na enostopenjske in večstopenjske, pokončne in ležeče ter enostransko in dvostransko delujoče batne kompresorje.



Slika 13: Enostopenjski, dvostopenjski in dvostranski batni kompresor

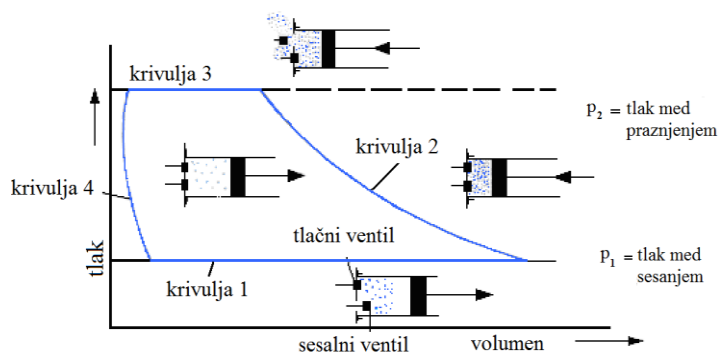
3.3.1.1 Delovanje batnega kompresorja

Batni kompresor v osnovi sestavljajo: bat, cilindar, ojnica, križnik, krmilni mehanizem in ročična gred.

Kompresor ima en tlačni ventil in enega ali več sesalnih ventilov. Ventili so v obliki ploščic z vzmetjo; njihova naloga je, da zapirajo odprtine ventilov. Pri odmiku bata od pokrova se v valju ustvari podtlak, ki dvigne ploščice sesalnega ventila in odpre zraku pot v valj. V povratnem gibu bata se v valju ustvarja nadtlak, ki zapre sesalne ventile, in v valju začne naraščati tlak, ki je malo višji od tlaka v tlačnem vod. Zaradi razlike tlakov se dvignejo ploščice tlačnega voda in bat iztisne zrak v tlačni vod. Med obema stenama je tako imenovani škodljivi prostor, ki služi, da bat ne zadane ob pokrov valja. Velikost škodljivega prostora izražamo kot delež ε_0 volumna:

$$\varepsilon_0 = \frac{V_0}{V_g}$$

Volumen celotnega cilindra kompresorja je vsota škodljivega prostora V_0 in volumna bata kompresorja V_g .



Slika 14: Prikaz delovanja batnega kompresorja

Krivulja 1: SESANJE Začne se sesanje plina, odpre se sesalni ventil in volumen plina v valju narašča pri enakem tlaku p_1 .

Krivulja 2: KOMPRESIJA Sesalni ventil se zapre, volumen plina se začne zmanjševati, temperatura se dviguje, tlak naraste do točke p_2 .

KRIVULJA 3: PRAZNJENJE Odpre se ventil za izpust plina iz cilindra, volumen se zmanjšuje pri stalni temperaturi in stalnem tlaku p_2 .

KRIVULJA 4: EKSPANZIJA Zapre se ventil za izpust plina, sesalni ventil se ne odpre takoj, ko bat spremeni smer gibanja, saj mora najprej ostanek plina v valju toliko ekspandirati, da postane tlak v valju nižji od tlaka v sesalnem vod. Nato se odpre sesalni ventil. Tlak se znižuje ob povečanju volumna. Nato ponovno nastopi sesanje (krivulja 1).

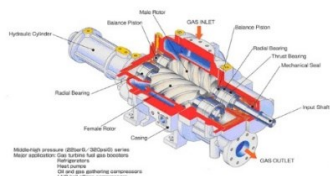
3.3.2 Rotacijski kompresorji

Pri rotacijskih kompresorjih se zrak lahko stiska z vrtenjem različno oblikovanih teles, vgrajenih v primeren okrov. Ti kompresorji nimajo batov in ročične gredi. Namesto tega se pri njih uporabljajo vijaki, krilca, lamele in druge oblike teles, ki rotirajo in tako komprimirajo zrak. Poznamo vijačne, krilne ali lamelne, loputne in kompresorje z vodnim obročem.

3.3.2.1 Vijačni kompresorji

Uvrščamo jih med rotacijske kompresorje. Pri vijačnih kompresorjih bistveno funkcijo stiskanja zraka opravljata ženski in moški rotor, ki se gibljeta v smeri eden proti drugemu, volumen pa se med njima in ohišjem zmanjšuje.

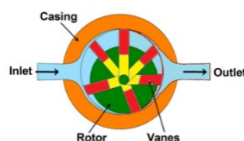
Zaradi tihega obratovanja, zanesljivosti in enostavnega vzdrževanja so primerni za velike in manjše industrijske obrate. Vijačni kompresorji v kompresorskih postajah zagotavljajo zanesljivo in konstantno dobavo čistega komprimiranega zraka, ki v kombinaciji z regulatorji delovanja zagotavljajo nizko porabo energije. Olje se v kompresor med stiskanjem zraka vbrizgava zaradi hlajenja naprave, s tem tudi ustvarja zaščitno oblogo med gibljivimi deli in odstranjuje prašne delce. Komprimiran zrak, ki je pomešan z mazivom, se izpihava iz naprave in vstopa v rezervoar za separacijo. Olje se izloči preko filtra zaradi svoje teže. Po separaciji olje prehaja skozi hladilnik in se ponovno vbrizga v kompresor. Zaradi lastnega hladilnega sistema vijačni kompresorji omogočajo neprekinjeno delovanje in tudi ne potrebujejo tako velike tlačne posode kot batni kompresorji. Vijačni kompresorji delujejo med 4 kW in 250 kW in proizvajajo delovni tlak od 5 barov do 13 barov.



Slika 15: Vijačni kompresor

3.3.2.2 Lamelni kompresorji

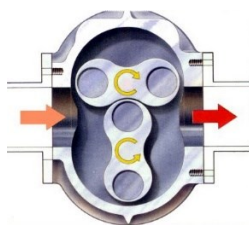
Lamelni kompresor je sestavljen iz statičnega cilindra, v katerem je rotor postavljen izven centra. V samem rotorju so reže, po katerih se lamele prosto gibljejo; centrifugalna sila jih drži v konstantnem stiku z ohišjem. Tako ne pride do zračnih izgub, lamele pa drsijo na zelo tankem sloju olja.



Slika 16: Lamelni kompresor

3.3.2.3 Rootsova puhala

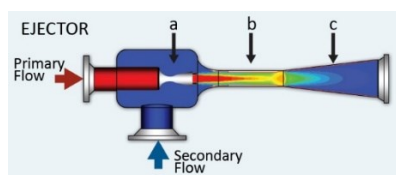
V sredini ohišja sta vpeta med seboj povezana enaka bata oziroma zobnika, ki se vrtita vsak v svoji smeri. Bata se med seboj ne dotikata, niti se ne dotikata sten, so pa med njima vmesne ozke špranje zaradi tesnosti. Rootsova puhala uporabljamo predvsem za premagovanje tlačnih izgub v večjih sistemih.



Slika 17: Rootsova puhala

3.3.3 Ejektorji

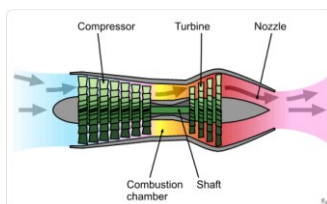
Ejektor je mehanska naprava, v kateri se ustvari vakuum, potreben za delovanje sistema doziranja. Sestavljen je iz pogonske šobe, mešalne komore, nepovratnega ventila in izstopnega priključka. Ejektorji nimajo batov, ventilov, rotorjev ali drugih gibljivih delov.



Slika 18: Ejektor

3.3.4 Turbokompresorji

Turbokompresorji se uporabljajo predvsem tam, kjer je potreba po večji količini zraka pri nižjih tlakih. Sestavljeni so iz dveh podobnih delov, turbine in kompresorja. Delovna snov teče med posebej oblikovanimi lopaticami, ki so v ohišju. Energija se povečuje v eni ali več stopnjah, pri tem se povečuje gostota in temperatura, zmanjšuje pa se prostornina. Izdelujejo jih v aksialni in centrifugalni izvedbi, uporabljajo pa se predvsem za pogon pnevmatičnih orodij in za regulacijske in krmilne naprave.



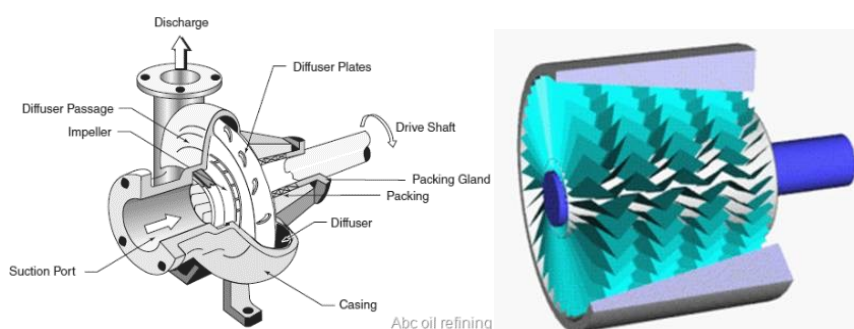
Slika 19: Turbokompresor

3.3.4.1 Aksialni kompresorji

V nasprotju s centrifugalnimi kompresorji plin pri aksialnih kompresorjih običajno vstopi in izstopi iz kompresorja v osni smeri (vzporedne z osjo vrtenja). Ti kompresorji se uporabljajo predvsem v industriji, v vetrovnikih, v predorih, za aplikacije, ki vključujejo velike hitrosti pretoka plina in relativno nizke izstopne pritiske. Sestavljeni so iz velikega števila vrtečih lopatic, povezanih s stacionarnimi nastavljivimi lopaticami, pritrjenimi na ohišju kompresorja.

3.3.4.2 Centrifugalni kompresorji

So dinamični stroji, ki z vrtenjem rotorja (impeller) pospešujejo zrak in z usmerjanjem skozi stator (difuzor) s hitrim ustavljanjem kinetično energijo pretvarjajo v tlačno energijo. Pretok zraka skozi kompresor je obrnjen pravokotno na os vrtenja. Proizvajajo delovni tlak od 1,3 do 40 barov. Uporabljajo se predvsem v farmacevtski, kemični, tekstilni industriji.



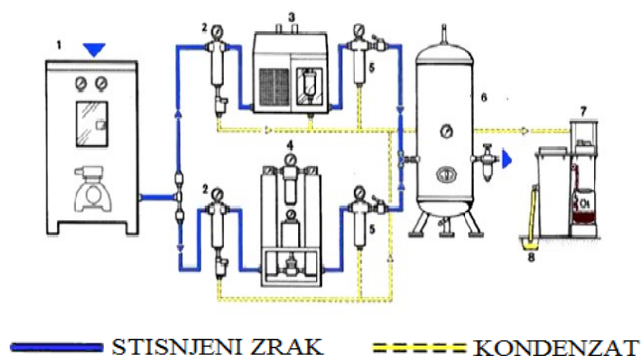
Slika 20: Centrifugalni in aksialni kompresor

3.4 SISTEM ZA KOMPRIMIRAN ZRAK

Sistem za komprimiran zrak je v osnovi sestavljen iz kompresorske postaje, razvoda zraka in končnih porabnikov.

Ker je na sistem priključenih več različnih porabnikov, se mora sistem prilagoditi na največjega porabnika, saj tako lahko dovaja zadosten tlak do vsakega porabnika. V tem primeru je v sistemu potreben višji tlak, kar je ekonomično neracionalno, v praksi pa s tem povečamo stroške.

Razvod s komprimiranim zrakom, ki oskrbuje končne porabnike, mora zagotavljati zanesljivo in varno delovanje. Razvod mora zagotavljati ustrezen volumski pretok, zanesljivo obratovanje in vse naprave v sistemu morajo biti oskrbovane z zadostnim delovnim tlakom s čim manjšimi tlačnimi izgubami.



Slika 21: Tipična shema pridobivanja kakovostnega stisnjenega zraka

Legenda:

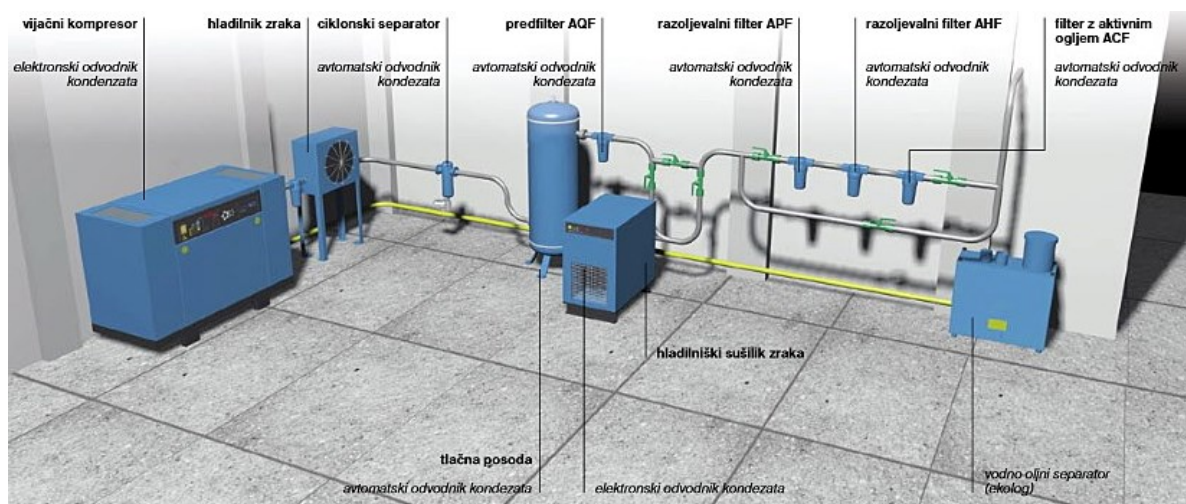
1. vijačni kompresor
2. ciklonski filter
3. hladilniški sušilec zraka
4. adsorpcijski sušilec zraka
5. ciklonski filter
6. tlačna posoda
7. ločilnik olja in vode
8. odtočna posoda za vodo

Pripravo komprimiranega zraka v grobem delimo na 4 faze:

- proizvodnjo komprimiranega zraka (kompresor, samostojne enote ali v kompletu s tlačno posodo in sušilcem komprimiranega zraka)
- pripravo komprimiranega zraka (sušilci zraka, filtri, separatorji kondenzne posode; regulatorji tlaka, pripravne grupe)
- transport komprimiranega zraka (cevi, hitre spojke in priključki)
- uporabo komprimiranega zraka (pnevmatske naprave in orodja)

4 KOMPRESORSKA POSTAJA

Kompresorska postaja zagotavlja proizvodnjo komprimiranega zraka, ki v grobem sestoji iz kompresorja, hladilniškega sušilnika zraka, tlačne posode, filtrov, odvajalnikov kondenzata ter vodno-oljnega separatorja. Vsi ti sestavni elementi sestavljajo glavni vod, ki nadalje vodi po distribucijskih cevovodih do končnih porabnikov.



Slika 22: Kompresorska postaja

4.1 LOKACIJA IN VELIKOST PROSTORA KOMPRESORSKE POSTAJE

Pri načrtovanju kompresorske postaje se moramo zavedati, da se pri procesu komprimiranja zraka odvede velika količina odvečne toplote, saj se skoraj celotna porabljena električna energija spremeni v toploto. Odpadno toploto je potrebno odvesti, sicer pride do akumuliranja v kompresorju, kar lahko privede do njegovih mehanskih poškodb.

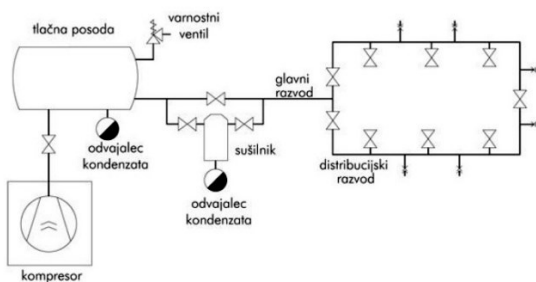
Kompresorji morajo biti postavljeni na dobro prezračenem prostoru, da je dovod čistega in svežega zraka nemoten. Zelo pomembna je maksimalna temperatura okolice kompresorske postaje, ki naj ne bi presegla 40 °C. Zrak, ki se izpihuje, je tudi do 25 °C toplejši od temperature dovodnega zraka in ga v pogostih primerih z določenimi kanali izkoristimo za ogrevanje prostorov. Zunanja inštalacija na odprtem prostoru je prepovedana, predvsem zaradi letnih in zimskih neugodnih klimatskih razmer.

Velikost prostora postaje je odvisna od tipa in konstrukcije kompresorja. Potrebno je upoštevati priporočila proizvajalca kompresorja glede minimalnih odmikov od sten in sosednjih objektov v kompresorski postaji. Okoli kompresorja mora biti dovolj prostora zaradi ustreznega hlajenja kompresorja, za nemoteno vzdrževanje in servisiranje komponent kompresorja in tudi zaradi varnostnih razlogov v primeru požara.

4.3 GLAVNI IN DISTRIBUCIJSKI RAZVOD

Glavni razvod povezuje kompresorsko postajo s pripravo komprimiranega zraka in tlačno posodo. Razvod mora biti dovolj velikih (ustreznih) dimenzij, da lahko oskrbuje z minimalnimi izgubami vse distribucijske razvode.

Distribucijski razvodi transportirajo komprimiran zrak do posameznih porabnikov. Povezani so na glavni razvod in so manjših dimenzij od glavnega razvoda. Če je mogoče, je zaradi večje ekonomičnosti in manjših izgub smiselno razvod skleniti v obliki zaključene zanke. Zanka mora biti dovolj velikega premera, ker s tem na nek način tvorimo rezervoar zraka in posledično zmanjšamo hitrosti in padec tlaka.



Slika 23: Glavni in distribucijski razvod

Cevovodi so običajno izdelani iz nerjavečih materialov. Uporabljajo se bakrene, jeklene, pocinkane aluminijaste in plastične cevi.

4.3.1 Dimenzioniranje glavnega in distribucijskega razvodnega omrežja

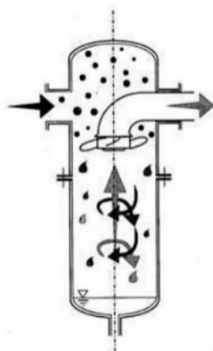
Glavni vod, speljan v zanki, je najugodnejša rešitev za zagotovitev dobave komprimiranega zraka do končnih porabnikov. Glavna prednost takšnega omrežja je, da so hitrosti zraka v cevovodu manjše, saj se zrak k vsakemu porabniku steka z dveh strani, zato so pretočne tlačne izgube v sistemu manjše.

Kadar imamo več porabnikov v sistemu, je najbolj idealna izvedba takšna, da je v vsakem prostoru sklenjena zanka, ki jo napaja ena sama veja; tako lahko pretok komprimiranega zraka v vsaki enoti omrežja merimo z enim merilnikom. Na tak način lahko tudi izločimo posamezne veje od ostalih v primeru odpravljanja napak, vzdrževanja, s tem pa ne oviramo drugih vej. Ustrezni premeri cevi omrežja so navadno izračunani na osnovi največje priporočljive hitrosti zraka v ceveh, katera znaša 6.0 m/s. Če so hitrosti večje od navedene, so tlačne izgube v ceveh prevelike. Večje hitrosti zraka (do 20 m/s) so sprejemljive le v zelo kratkih predelih cevovoda, do 8 m. To je sprejemljivo le v primeru, ko je zelo velik končni porabnik zelo blizu kompresorja. Dimenzioniranje cevovodov je vedno boljše zaokroževati navzgor, saj lahko poddimenzioniran cevovod povzroča večje hitrosti pretoka zraka, s tem večje tlačne izgube in nevarnost, da se ne izloča vodni kondenzat iz zraka.

Dovodni cevovod do krožnega razvoda mora biti predimenzioniran, saj poddimenzioniran cevovod povzroča večje hitrosti pretoka zraka, s tem večje tlačne izgube in nevarnost, da se ne izloča vodni kondenzat iz zraka. Presek dovodnega cevovoda naj bo dvakrat večji kot presek cevi, uporabljene za dobavno linijo. Omrežje mora biti načrtovano tako, da se tlak pri končnem uporabniku, pri polni rabi komprimiranega zraka ne zniža za več kot 0.1 do 0.2 bara.

4.3.2 Odvajanje kondenzata iz omrežja

Kompresorji iz okolice med delovanjem sesajo zrak, ki ima določen odstotek vlage. Vlaga je v sistemu nezaželena in jo odstranjujemo v hladilnikih s kondenzacijo ter z ohlajanjem komprimiranega zraka v tlačnih posodah in cevovodih. V cevovodih odvajamo kondenzat na najnižjih točkah inštalacije, kjer so najpogosteje uporabljeni kondenzni lončki s plovcem, ki se odprejo, ko so polni vode, in se ob izpraznitvi samodejno zaprejo nazaj.



Slika 24: Princip delovanja kondenznega lončka

Če pred razvodom ni vgrajen sušilec zraka, je priporočljiv nagib cevovoda 2 % v smeri toka zraka. S tem se izognemo usedlinam in preprečimo zastajanje kondenzata v cevovodu, kar povzroča korozijo na cevovodih.

Cevi za porabnike so priključene na zgornji strani, saj se s tem izognemo, da bi kondenzat dosegel stroje in naprave, ki so vezani na razvod.



Slika 25: Potreben naklon cevi za odvajanje kondenzata

4.3.3 Filtriranje komprimiranega zraka

Za zagotavljanje ustrezne kvalitete moramo komprimiran zrak, preden pride v proizvodni proces, osušiti in filtrirati. Če pustimo, da onesnaženi delci ostanejo v sistemu, mešanica pusti škodljive posledice na pnevmatskih napravah; te povzročajo nepotrebne zastoje proizvodnje in zmanjšajo življenjsko dobo opreme. Montaža filtrov je lahko posamična ali v kombinaciji različnih stopenj filtriranja z več zaporednimi filtri. Osnovni filter ima nalogo, da ločuje grobe delce, ki vstopajo iz okolice v kompresorsko postajo. Ti filtri so nameščeni že na samem sesalnem vođu pred kompresorjem, kjer pri vijračnih kompresorjih ščitijo vijak pred poškodbami. S filtri se torej delno odstrani kondenzat in skoraj v popolnosti odstranijo olje in trdni delci, medtem ko sušilniki komprimiranega zraka odstranijo vodno paro, preden ta doseže točko uporabe.

Običajno je sistem sestavljen iz dveh zaporedno postavljenih filtrov, od katerih se eden nahaja pred sušilnikom, drugi pa za njim. Pred sušilnikom se nahaja predfilter, ki izvaja grobo filtracijo komprimiranega zraka in s tem ščiti sušilnik pred zamažitvijo; za sušilnikom pa se nahaja mikrofilter, ki izvaja fino filtracijo komprimiranega zraka in iz njega odstranjuje olje. Oba filtra imata na ohišju nameščen avtomatski odvajalnik.



Slika 26: Prerez filtra z vložkom in izločevalnikom kondenzata

4.3.4 Sušenje komprimiranega zraka – sušilniki

Atmosferski zrak, ki ga kompresor sesa, je mešanica plinov, ki vsebuje določen odstotek vlage. Pri ohlajanju komprimiranega zraka se temperatura znižuje in s tem prične vodna para kondenzirati. Pri neosušenem zraku lahko pride do težav, če se pojavi kondenzat v omrežju, posebno v primerih, ko potekajo cevovodi zunaj zgradb, kjer pri nizkih temperaturah lahko kondenzat zamrzne in tako povzroči okvare filtrov in posledično tudi strojev. Vlago iz sistema izločamo s filtracijo zraka, kondenzacijo v hladilniku kompresorja, cevovodih in tlačnih posodah ter s sušilniki komprimiranega zraka. Kadar je potreba po zelo kakovostnem komprimiranem zraku z zelo nizko vsebnostjo vlage, uporabljamo naprave za dodatno sušenje komprimiranega zraka, ki jim pravimo sušilniki. Uporabljajo se hladilniški ali adsorpcijski sušilniki. Hladilniški sušilniki se uporabljajo v industriji, kjer zahteve po kakovosti komprimiranega zraka niso visoke; adsorpcijski sušilniki pa se uporabljajo za delovanje zahtevnih aplikacij in strojev v ekstremnih pogojih okolice.

4.3.5 Ciklonski izločevalnik kondenzata

Ciklonski izločevalnik kondenzata služi kot prva stopnja pri pripravi komprimiranega zraka, kjer se kapljice mehansko odstranjujejo z vrtnčenjem zraka. Običajno je nameščen takoj na izstopu iz kompresorja ali za sušilnikom.

Z njihovo namestitvijo lahko v največji meri odstranimo tekoče delce kondenzata, s tem zaščitimo sušilnike in filtre pred okvaro.



Slika 27: Ciklonski izločevalnik kondenzata

4.3.6 Tlačna posoda

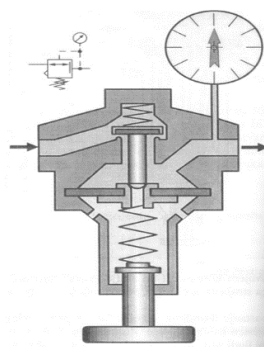
Komprimiran zrak, ki ga proizvede kompresor, se shranjuje v tlačni posodi. Zagotavlja dobavo komprimiranega zraka v konicah, z zmožnostjo izenačitve nihanja tlaka, in učinkovito izloča kondenz. Motor kompresorja se ob tem manj pogosto vklaplja, njegova obremenitev in obraba sta manjši. Na dnu posode imajo odprtino za izpust kondenzata, na kateri je nameščen kroglični ventil ali avtomatski izločevalec. Tlačna posoda mora biti korozijsko odporna in pravilno dimenzionirana glede na dobavno količino zraka iz kompresorja in glede na porabo komprimiranega zraka.



Slika 28: Tlačne posode

4.3.7 Regulator tlaka

Regulator tlaka je naprava, s katero reguliramo tlak pred porabnikom. Zagotavlja stalno nastavljeno vrednost delovnega tlaka, neodvisno od nihanja primarnega tlaka in porabe. Uporabljamo ga v primerih, ko imamo omrežje nastavljeno na višjem delovnem tlaku, z regulatorjem pa zreduciramo tlak v sistemu na obratovalni tlak, ki ga potrebujejo nekateri porabniki. Na regulatorju je montiran manometer, s katerega lahko odčitavamo tlak.



Slika 29: Regulator tlaka

4.3.8 Separatorji voda-olje

Separatorji voda-olje zbirajo tekočine, ki se izločajo iz filtrov, sušilnikov in drugih virov. V komorah naprave separatorja se nato tekočine prečistijo, tako da na izhodu dobimo posebej vodo in olje. Separator kot zadnji člen v sestavi elementov kompresorske postaje poskrbi, da se odpadne tekočine nadzorovano zbirajo. S separatorji voda-olje zadostimo v skladu z okoljevarstveno zakonodajo ekološkim zahtevam pred izpustom v okolico, saj s tem ne povzročamo onesnaževanja okolice.



Slika 30: Separator voda-olje

4.4 IZGUBE KOMPRIMIRANEGA ZRAKA

V proizvodnji komprimiranega zraka so izgube neizogibne, mogoče pa jih je zmanjšati z rednim pregledovanjem in vzdrževanjem. Pregledovati jih je potrebno zaradi možnih puščanj. Preverjati je potrebno tudi mesta za izpust kondenzata in odvajanje nečistoč, saj tako zanesljivo zmanjšujemo porabo energije. Medtem ko je potrebno določene dele cevovoda ohranjati pod tlakom, lahko posamezne dele omrežja, kadar jih ne uporabljamo, z vgrajenimi ventili zapremo. Z izolacijo posameznih vej in merjenjem tlaka v izolirani veji, ki je pod tlakom, lahko ugotovimo, ali je v izoliranem delu sistema puščanje. V vejah, kjer je padec tlaka hitrejši, je prisotno večje puščanje, zato moramo pozornost najprej posvetiti tem delom sistema.

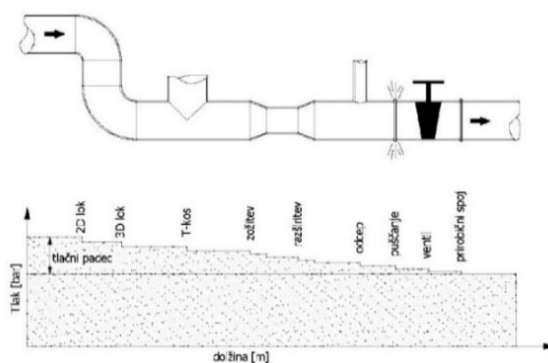
4.4.1 Mesta in vrste izgub

Izgube komprimiranega zraka so običajno prisotne v celotnem sistemu dobave zraka. Pričnejo se že na samem mestu proizvodnje komprimiranega zraka, nadaljujejo po celotnem razvodu in potekajo vse do končnih porabnikov. Izgube v osnovi lahko razdelimo v dve skupini:

- izgube zaradi padcev tlaka kot posledic različnih uporov, ki se pojavljajo pri pretakanju zraka;
- puščanje zraka zaradi netesnosti v sistemu.

4.4.2 Tlačne izgube

Tlačnim izgubam se lahko izognemo s pravilno dimenzioniranimi cevovodi in ustreznimi ter redno pregledanimi filtri. Največji padci tlaka se pojavljajo na odcepih, filtrih, fittingih in priključkih, zožitvah in razširitvah, pripravnih enotah in ob morebitnem prevelikem puščanju na spojih cevi. Padec tlaka je izraz za zmanjšanje tlaka od vstopnega mesta zraka do porabnika. Pri pravilno dimenzioniranem sistemu naj bi bil celoten padec tlaka nižji od 10 %. Ob prevelikem padcu tlaka je potrebno povečati obratovalni tlak, s tem pa povečamo stroške in možnost okvar komponent celotnega sistema.



Slika 31: Tlačne izgube na določenem odseku cevovoda

4.4.3 Puščanje

Puščanje predstavlja največji problem v sistemu cevovoda. Na mestih, kje pušča, se ustvarjajo velike izgube za lastnika sistema. Zaradi puščanja se tlak v sistemih znižuje, posledično se kompresor pogosteje vklaplja in s tem zvišuje stroške in znižuje ekonomičnost sistema. Na mestih puščanja, kjer zrak izteka z veliko hitrostjo, se obnaša kot šoba.

Puščanje sistema s komprimiranim zrakom se pojavi zaradi:

- zarjavelih cevi
- nečistoče na hitrih spojih
- puščanja na spojih in hitrih spojkah
- puščanja na zvarih
- puščanja ventilov
- puščanja na filtri ali regulatorju tlaka
- nedelovanja varnostnega ventila



4.4.3.1 Metode za ugotavljanje puščanj

- izločitev posameznih vej
- uporaba peneče raztopine
- uporaba odoratorja na sesalni strani kompresorja
- uporaba ultrazvočnega detektorja puščanj
- test netesnosti

Z izolacijo posameznih vej in merjenjem tlaka v izolirani veji, ki je pod tlakom, lahko ugotovimo, ali v izoliranem delu sistema pušča komprimiran zrak.

Uporaba peneče raztopine je primerna za manjša puščanja, kjer se na mestih puščanja ustvarjajo mehurčki, in je standardna metoda za odkrivanje netesnosti na spojih in ventilih. Ultrazvočni detektor meri amplitudo zvočnega nihanja in s tem podaja podatke, koliko zraka uhaja.

S testom netesnosti lahko dokaj natančno ocenimo stopnjo puščanja, tako da ob odklopu vseh uporabnikov kompresor pri spodnji vrednosti tlaka zaženemo, tlak v sistemu povišamo na običajni obratovalni tlak in merimo čase polnjenja.

Čas praznjenja omrežja merimo tako, da merimo čas od zgornje vrednosti tlaka (delovni tlak) do spodnje vrednosti tlaka, ko se ponovno samodejno vklopi kompresor. Meritev ponovimo 5 x.

$$\text{Puščanje} = \frac{\dot{V}_k \cdot T}{T + t} \quad [\text{l/s}]$$

$\dot{V}_k$ kapaciteta kompresorja [l/s]

T.....povprečni čas polnjenja omrežja

t.....povprečni čas praznjenja omrežja

5 PROIZVODNJA IN DISTRIBUCIJA KOMPRIMIRANEGA ZRAKA – PREMOGOVNIK VELENJE

Kompresorska postaja NOP napaja s komprimiranim zrakom celotno jamo, ki obsega več kot 80 km prog, in tudi zunanje objekte na področju NOP (VEPLAS, HTZ, RGP in PLP). V kompresorski postaji je montiranih 6 zračno hlajenih vijačnih kompresorjev znamke KAESER. Razpoložljiva kapaciteta v omenjeni postaji je 129,9 m^3/min pri obratovalnem tlaku 6,5 bara. Vsi vgrajeni kompresorji so vijačni in zračno hlajeni. Kompresorje v zimskem času izkoriščamo za gretje vstopnega zraka v jamo.

5.1 KOMPRESORSKA POSTAJA NOP

Vgrajeni kompresorji so tip proizvajalca KAESER, in sicer:

Tip:	DSD 171/7,5 bar	2 kosa
Kapaciteta	$Q = 16,3 \text{ m}^3/min$	
Hlajenje	zračno	
Moč motorja	$P = 90 \text{ KW}$	

Tip:	DSD 172/7,5 bar	1 kos
Kapaciteta	$Q = 16,3 \text{ m}^3/min$	
Hlajenje	zračno	
Moč motorja	$P = 90 \text{ KW}$	

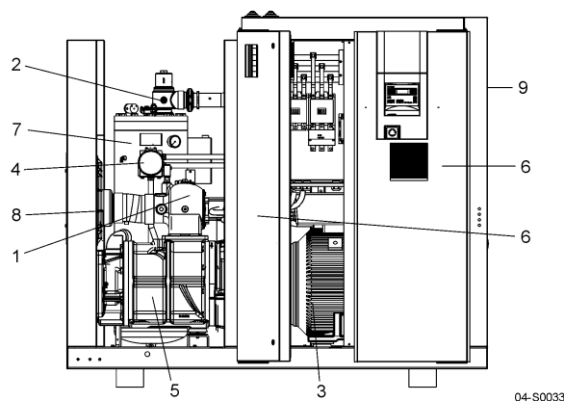
Tip:	DSD 241/7,5 bar	2 kosa
Kapaciteta	$Q = 24,0 \text{ m}^3/min$	
Hlajenje	zračno	
Moč motorja	$P = 132 \text{ KW}$	

Tip:	DSD 241/7,5 bar SFC	1 kos
Kapaciteta	$Q = 23,02 \text{ m}^3/min$	
Hlajenje	zračno	
Moč motorja	$P = 132 \text{ KW}$	

Za zagotavljanja suhega in čistega zraka je vgrajena še oprema:

- hladilniški sušilec: Tip: TE375 3 kosi
- mikrofilter: Tip: FE 526 D 1 kos

5.1.1 Konstrukcija KAESER kompresorja



Slika 32: Shematski prikaz KAESER kompresorja

Pregled kompresorja

- 1 Vhodni ventil
- 2 Protipovratni ventil minimalnega tlaka
- 3 Motor kompresorja
- 4 Oljni filter
- 5 Kompresorski blok
- 6 Stikalna omara
- 7 Posoda oljnega separatorja
- 8 Zračni filter
- 9 Oljni/zračni hladilnik

Iz okolja se zrak sesa skozi zračni filter (8) in se očisti. Zračni filter ščiti hladilnik pred umazanijo. Elektromotor (3) poganja kompresor. V blok kompresorja se vbrizgava olje, ki hladi in maže gibljive dele. V posodi za izločanje se hladilno olje (7) ločuje od komprimiranega zraka in se hladi v oljnem hladilniku (9). Olje teče skozi oljni filter (4) in se vrača nazaj na mesto vbrizgavanja. Za regulacijo in optimizacijo temperature hladilnega olja skrbi toplotni ventil. V posodi za izločanje olja (7) se komprimiran zrak oddvoji od olja ter skozi povratni ventil (2) prihaja v zračni hladilnik (9). Zračni hladilnik hladi zrak na potrebno temperaturo.

Delovanje kompresorjev je avtomatsko, v odvisnosti od skupnega tlaka in od nastavljenega tlaka posameznega kompresorja. Kompresor št. 1, ki je frekvenčno reguliran, obratuje stalno in se prilagaja porabi komprimiranega zraka. Delovanje vseh šestih kompresorjev nadzira mikroprocesorska krmilna enota SIGMA AIR MANAGER, ki poleg kontrole vrši tudi enakomerno porazdelitev obratovalnih ur.



Slika 33: Celovit prikaz kompresorske postaje NOP

5.1.2 Centralni računalnik – Sam 8

Centralni računalnik Sam 8 programsko krmili kompresorje. Njegova natančnost odzivanja na padec tlaka je 0.01 bara, vzdržuje kontinuiteto tlaka, beleži okvare, s pomočjo tipal prikazuje vse vidne parametre ter opozarja na predvidene periodične kontrolne vzdrževalne posege, omogoča vpogled na daljavo. V primeru previsoke temperature v kompresorski postaji se avtomatsko vklopita strešna ventilatorja (omogočeno je tudi ročno obratovanje ventilatorjev). V kompresorski postaji NOP je vgrajen odvajalec kondenzata ECO, ki predstavlja rešitev odvajanja kondenzata neprekinjeno v vseh vremenskih pogojih; njegovo delovanje kontrolira centralni računalnik Sam 8.



Slika 34: Centralni računalnik Sam 8 (levo), odvajalec kondenzata ECO (desno)

5.1.3 Električno krmiljene žaluzije

Za ustrezno klimo v kompresorski postaji skrbijo odvodni kanali toplega zraka z žaluzijami, ki z ventilatorji in tipali za merjenje temperature skrbijo za ustrezno mikroklimo. Žaluzije za prekrmljenje zraka so na elektromotorni pogon, ki je povezan na centralni računalnik SAM 8. Nastavitev temperature je enostavna, saj nam možnost kombinacije žaluzij omogoča praktično neomejene možnosti.



Slika 35: Električno krmiljene žaluzije

5.1.4 Sušilniki KAESER

Sušilniki KAESER komprimiran zrak osušijo na nastavljeno vrednost, s tem odvedejo vlago iz komprimiranega zraka in zadržijo 90 % vlage.



Slika 36: Sušilniki KAESER

5.1.5 Tlačna posoda

Za blažitev trenutnih koničnih porab komprimiranega zraka sta v sistem vgrajeni dve tlačni posodi po 2 x 20 m³. Na izhodu iz kompresorske postaje je zrak očiščen (vsebnost delcev pod 50 µm) in suh.



Slika 37: Tlačni posodi za kompresorsko postajo NOP

Za lažji nadzor in spremljanje pomembnih parametrov v kompresorski postaji se preko mikroprocesorske krmilne enote SIGMA AIR MANAGER ter centralnega računalnika prenašajo podatki v varnostno-tehnološki informacijski sistem (VTIS).

5.2 PREGLED PORABE IN STROŠKOV KOMPRIMIRANEGA ZRAKA V PREMOGOVNIKU VELENJE

Poraba komprimiranega zraka za jamo se spreminja in znaša dnevno od 20 m³/min pa do 60 m³/min, kar prikazuje spodnji graf. V dopoldanskem času je največja poraba okoli 11. ure, po končani izmeni, okoli 14.00 ure, pa je poraba zraka najnižja, saj skoraj vsa delovišča v jami v tem času ne obratujejo.



Slika 38: Pretok zraka NOP – jama v določenem časovnem obdobju

Okvirni izračun letnega stroška ob upoštevanju delovanja vseh kompresorjev.

Moč kompresorja KAESER DSD 171 je 90 kW (2 kom).

Moč kompresorja KAESER DSD 172 je 90 kW (1 kom).

Moč kompresorja KAESER DSD 241 je 132 KW (3 kom).

Delovne ure posameznega kompresorja znašajo 6048 delovnih ur/leto.

Strošek komprimiranega zraka za elektriko znaša od 0,010 in 0,040 €/kWh za omrežnino.

Strošek komprimiranega zraka privzamemo 0,10 €/kWh.

$$P_{DSD\ 171} = 90KW * 6048 \frac{ur}{leto} * 0,10 \frac{€}{kwh} = 54432 \text{ €/leto}$$

$$P_{DSD\ 171} * 2 \text{ kom} = 108864 \text{ €/leto}$$

$$P_{DSD\ 172} = 90KW * 6048 \frac{ur}{leto} * 0,10 \frac{€}{kwh} = 54432 \text{ €/leto}$$

$$P_{DSD\ 172} = 54432 \text{ €/leto}$$

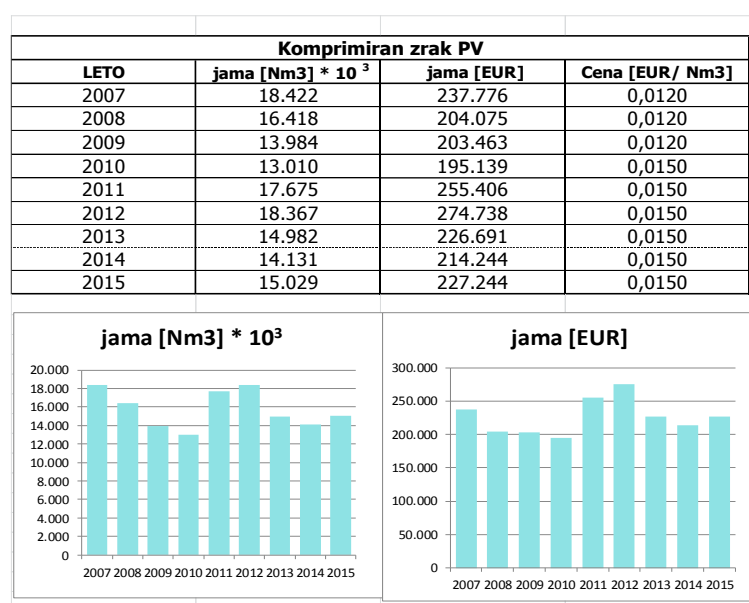
$$P_{DSD\ 241} = 132 * 6048 \frac{ur}{leto} * 0,10 \frac{€}{kwh} = 79834 \text{ €/leto}$$

$$P_{DSD\ 241} = 239502 \text{ €/leto}$$

Skupni stroški za električno energijo za vse kompresorje znašajo:

$$P = P_{DSD\ 172} + P_{DSD\ 172} + P_{DSD\ 241} = 402798 \text{ €/leto}$$

Ob predpostavki 45 % izgub zaradi netesnosti omrežja vsako leto zaradi puščanja omrežja izgubimo 221538 €/leto.



Slika 39: Tabela porabe in stroškov komprimiranega zraka v jami

Opomba: Nm³ oznaka N pomeni, da je merjeno pri standardnem tlaku 1 bar in temperaturi 0 °C ali 20 °C.

Iz tabele je razvidno, da je samo za jamo letni povprečni strošek komprimiranega zraka okoli 200.000 EUR.

5.2.1 Stroški rednega vzdrževanja kompresorske postaje NOP

Stroški rezervnih delov letno:

Menjava zračnih filtrov	8 kosov	1 x letno	115 EUR x 8 = 950 EUR
Menjava separatorja	8 kosov	1 x letno	250 EUR x 8 = 2000 EUR
Menjava oljnih filtrov	8 kosov	1 x letno	45 EUR x 8 = 360 EUR
Menjava olja	600 l	1 x letno	8 EUR x 600 = 4800 EUR

Skupaj stroški vzdrževanja 8110 EUR letno.

6 VARNOSTNO-TEHNOLOŠKI INFORMACIJSKI SISTEM

Varnostno-tehnološki informacijski sistem (VTIS) je povezan v informacijsko omrežje PV in služi za neprekinjen nadzor ter alarmiranje varnostno-tehnoloških parametrov na površini jame kot tudi v jami (spremljanje plinskih razmer, varnostne zračilne parametre, krmiljenje odkopne mehanizacije, avtomatizacija trakov, črpališč, glavnih ventilatorskih postaj, videonadzor).

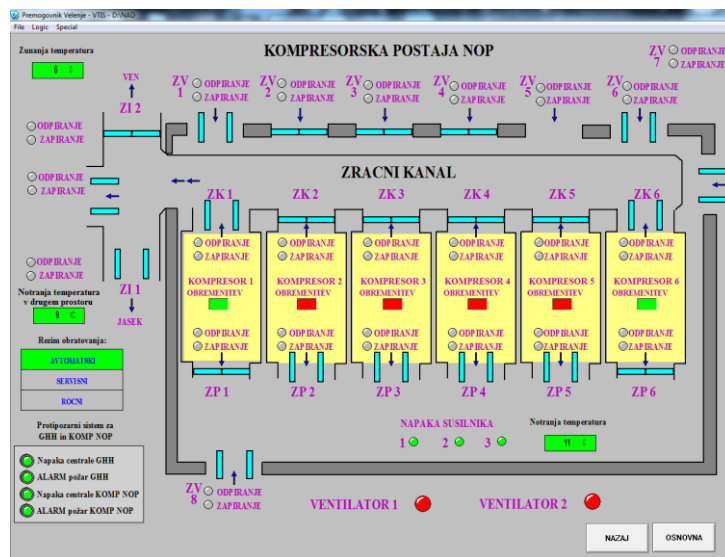


Slika 40: Nadzorna soba PV

Spremlja se tudi kompresorska postaja NOP in jamski razvod v jami. Pridobljeni podatki so prikazani v nadzorni sobi dežurnega PV.

Spremljajo se podatki, kot so:

- število delujočih kompresorjev in morebitne napake
- ventili odprto/zaprto za določena področja
- spremljanje pretoka zraka
- spremljanje tlakov
- spremljanje temperature v kompresorski postaji
- napake v sušilnikih



Slika 41: Prikaz spremljanja kompresorske postaje NOP v nadzorni sobi PV

7 DOVOD IN OSKRBA KOMPRIMIRANEGA ZRAKA DO KONČNIH PORABNIKOV V JAMI

Komprimiran zrak prihaja v jamo po glavnem cevnem vodu, ki je speljan po ceveh DN 200 iz glavne kompresorske postaje do stavbe NOP, kjer se spusti v jamo po jašku NOP in od tam potuje do diagonalne vezi na K-43. Tam se razcepi na dva voda, od katerih eden potuje po ceveh DN 125 za porabo v jamo Pesje, drugi pa po ceveh DN 100 po transportni progi mimo črpališča K-117 in naprej po transportni progi po Kadunji za porabo v jami Preloge. V jami se komprimiran zrak uporablja za delovanje pnevmatskih strojev in naprav, kot so kretnice, zračilna vrata ter dihalniki na deloviščih in jamskih progah.

7.1 VRSTE IN MONTAŽA CEVI

Po vseh jamskih deloviščih in poteh se za komprimiran zrak montirajo cevi dimenzije DN50 (2'') in DN80 (3'') dolžine 6 m. V območjih, kjer je večja poraba komprimiranega zraka in so večje višinske razlike od primarnega voda na K-43, se uporabljajo cevi DN80. Cevi v jami montirajo vodovodni inštalaterji, ki so strokovno usposobljeni za montažo in vzdrževanje cevi. Za napajanje jamskih delovišč s komprimiranim zrakom povezujejo cevi med seboj ACME spojke. ACME so hitro sestavljivi oziroma razstavljivi strojni elementi. V sklop cevnih spojk spadajo spojka ACME DN50 ali DN80 in tesnilo. Spojko po končani montaži zavarujemo z varovalko R4, saj s tem preprečimo odpiranje ACME spojke. Pred pričetkom kateregakoli dela na cevni spojki je potrebno zagotoviti, da omrežje oziroma vod ni pod tlakom in pred vsakim posegom v vod je potrebno razbremeniti pritisk v ceveh.



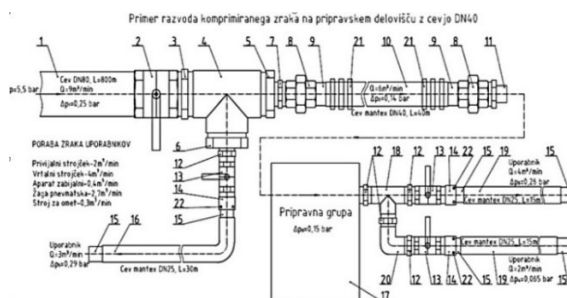
Slika 42: ACME spojka

7.2 KONTROLA TESNOSTI

V jami se izvaja tudi kontrola tesnosti cevni vodov s tlačnim manometrom na izhodu cevovoda in kontrola pravilnega delovanja merilne in kontrolne opreme ter brezhibnost ACME spojk. Na ugotovljenih mestih puščanja se vod razbremeni iz omrežja z zaprtjem ventila in se odpravi napaka. V večini primerov zadostuje zamenjava ACME tesnila, na mantex ceveh pa zamenjava in ponovna namestitev priključka na cev.

7.3 GIBLJIVE CEVI MANTEX

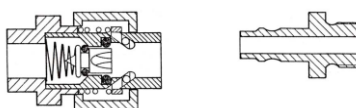
Vsi pnevmatski strojčki so na primarni vod komprimiranega zraka priključeni z gibljivimi cevmi preko pripravne grupe in zapornega ventila. Zaradi varnosti in prihoda zadostne količine zraka do porabnika ter njihove različne porabe zraka (odvisno od porabnika) moramo za dovod zraka do porabnika uporabljati gibljive cevi primernih dimenzij. V jami se uporabljajo gibljive cevi oznake MANTEX DN25, DN50, dolžine 15 m. Mantex cev ima zaradi varnosti na vhodni in izhodni strani nepovratni priključek, kjer v primeru izpada iz voda oz. porabnika ne pride do spuščanja zraka iz mantex cevi in posledično do nezgode.



Slika 43: Priključitev strojčkov na razvod komprimiranega zraka s cevjo MANTEX

7.4 VTIČNICA SKLOPNEGA PRIKLJUČKA

Za spoj glavnega voda in delovnih komponent uporabljamo cevne priključke. Največkrat so uporabni hitromenjalni sklopni priključki ali pa navojni priključki. Hitromenjalni sklopni priključki so standardni in omogočajo zelo veliko vpenjanj in odpenjanj. V glavnem vodu imamo nameščeno vtičnico, ki hkrati deluje tudi kot zaporni ventil. Na gumijasti cevi (mantex) ali plastični cevi, ki vodi zrak do porabnikov, pa je nameščen vtičnik.



Slika 44: Priključna vtičnica in vtičnik sklopnega priključka

7.5 NEPOVRATNI VENTILI

Nepovratni ventili lahko popolnoma zaprejo pretok v eni smeri, medtem ko v drugi smeri omogočajo neoviran pretok zraka z minimalno izgubo tlaka. Kot zaporni element je lahko uporabljen konus, kroglica ali membrana. Nepovratni ventili imajo vzmet, ki zapira pretok. Če je tlak na nasprotni strani vzmeti večji, kot je sila vzmeti, se ventil odpre.

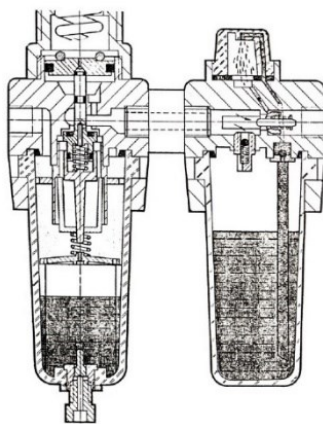


Slika 45: Nepovratni ventil

Da dosežemo ustrezno kvaliteto komprimiranega zraka in zagotovimo nemoteno delovanje pnevmatičnih naprav, uporabljamo pred vsakim delovnim mestom pripravno grupo.

7.6 PRIPRAVNA GRUPA

Naloga pripravne grupe je komprimiran zrak očistiti, naoljiti in ga pod določenim tlakom spustiti na delovno mesto. Z odstranjevanjem vlage in nečistoč v obliki umazanije preprečimo motnje in uničenje pnevmatskih naprav.



Slika 46: Pripravna grupa

Pripravno grupo sestavljajo:

- filter
- regulator tlaka
- naoljevalnik

Naloga filtra je čiščenje nečistoč in kondenzirane vlage iz komprimiranega zraka. Pri dotoku v prvi kozarec se zrak vrtinči, tekočinski delci zaradi centrifugalne sile obstanejo na steni kozarca in se nato zbirajo na dnu. Ko teče zrak skozi naoljevalnik, ta oskrbuje pnevmatične strojčke in naprave z mazalnim sredstvom, ki zagotavlja majhno trenje vrtečih se delov in jih varuje pred korozijo. Regulator tlaka zagotavlja konstanten delovni tlak, ki je neodvisen od porabe zraka. Običajno je montiran tudi merilnik tlaka, kjer lahko odčitamo nastavljen delovni tlak.

8 PORABNIKI KOMPRIMIRANEGA ZRAKA V JAMI

8.1 PNEVMATSKI STROJI IN NAPRAVE

Stroji in naprave, pri katerih je komprimiran zrak kot pogonski medij, so se uveljavili predvsem zaradi naslednjih prednosti:

- relativno cenene in enostavne izvedbe pogonov
- neobčutljive in robustne konstrukcije z nezahtevnim vzdrževanjem
- eksplozijske varnosti
- dodatnega izboljšanja jamske klime zaradi izrabljenega zraka

Na jamskih deloviščih se najpogosteje uporabljajo pnevmatski stroji za privijanje/odvijanje, vrtanje, žaganje, vibriranje materiala, odkopavanje, dvigovanje bremen, zabijanje itd. Vsaka pnevmatska naprava mora imeti ustrezen priključek za najbolj optimalen in varen dovod zraka iz mantex cevi na napravo, zato ima vsaka naprava predpisan priključek, ki ji najbolj ustreza.

8.1.1 Udarni strojček za privijanje/odvijanje matic

Strojčki so namenjeni za privijanje in odvijanje vijčnih zvez z različnimi momenti. Za delovanje potrebuje strojček za privijanje matic $1,6 \text{ m}^3/\text{min}$.



Slika 47: Strojček za privijanje matic Atlas Copco

8.1.2 Odkopna kladiva

Odkopna kladiva potrebujejo za delovanje $1,2 \text{ m}^3/\text{min}$.



Slika 48: Odkopno kladivo

8.1.3 Pnevmatске verižne žage

Služijo za razrez lesenih predmetov. Za pnevmatsko verižno žago PD51 je predpisan delovni tlak $2,7 \text{ m}^3/\text{min}$.



Slika 49: Pnevmatška žaga PD51

8.1.4 Vrtalna kladiva

Pnevmatško vrtalno kladivo najbolj optimalno deluje pod delovnim tlakom $4,5 \text{ m}^3/\text{min}$.



Slika 50: Vrtalno kladivo MFD90

8.1.5 Pnevmatška dvigala

Potezne naprave so namenjene dvigovanju in prestavljanju opreme na vseh jamskih deloviščih, za izvlačanje, dviganje in spuščanje bremen. Prepovedana je njihova uporaba za ropanje jeklene podgrade, razen s poteznimi napravami M63D, ki so namenjene ravno temu. Pnevmatška dvigala PROFI B48 se uporablja pod tlakom $1,5 \text{ m}^3/\text{min}$, za pnevmatska dvigala PROFI M63D pa se uporablja tlak $2,2 \text{ m}^3/\text{min}$.



Slika 51: PROFI M63D 3TI

8.1.6 Pnevmatiski vrtalni stroji

Pnevmatiski vrtalniki potrebujejo za svoje delovanje delovni tlak 2,5 m^3/min .



Slika 52: Pnevmatiski vrtalni stroj TURGMAN

8.1.7 Zabijalni aparati

Namenjeni so za zabijanje posebnih sponk v lesene in druge, po trdoti podobne materiale za dela pri izdelavi jamskih plaščev v jamah Premogovnika Velenje.



Slika 53: Zabijalni aparat FASCO F26C 90-40

8.1.8 Kotna brusilka

Namenjena je za rezanje in brušenje jeklenih predmetov.



Slika 54: Kotna brusilka

8.1.9 Škarje za rezanje pločevine

Namenjene so za rezanje pločevine do debeline 5 mm.



Slika 55: Škarje za rezanje pločevine

8.1.10 Ventilator VPAV-2-630

Pnevmatski ventilatorji se uporabljajo v jamah za prezračevanje delovišč, predvsem tam, kjer se ne smejo uporabljati električni ventilatorji. To so območja, kjer je velika eksplozijska nevarnost. Ventilator VPAV-2-630 je eksplozijsko zaščiten.

Povprečna hitrost zraka šestih zaporednih meritev je bila 20,1 m/s. Presek končne odprtine je bil 0,283 m². Torej je bil pretok zraka pri navedenih pogojih 341,3 m³/min.



Slika 56: Pnevmatiki ventilator VPAV-2-630

8.1.11 Pnevmatiki nakladalec EIMCO 12B

Nakladalec je namenjen za nalaganje usedlin v vodnih zbiralnikih črpališč. Nakladalna žlica je povezana z verigo preko vodil na vitel in je vodena z jeklenimi vrvicami. Usedline nalaga preko sebe v vozne enote. Pnevmatiki nakladalec je priklopljen na komprimiran zrak z gibljivo cevjo preko pripravnice in zapornega ventila.

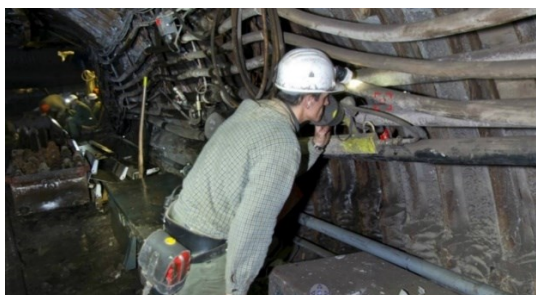
Tlak komprimiranega zraka mora biti 5–6 barov. Dolžina gibljive cevi od pripravne grupe do strojčka je lahko največ 50 m.



Slika 57: Nakladalec EIMCO 12B

8.1.12 Dihalniki

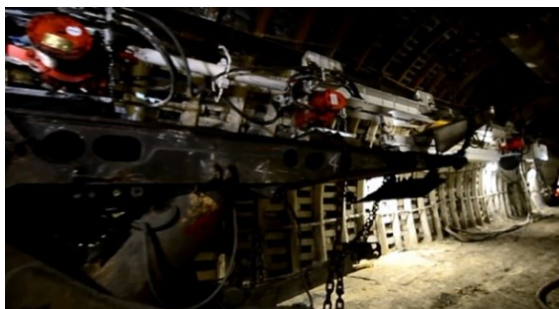
V primeru nenadnih povečanih koncentracij jamskih plinov si morajo zaposleni takoj namestiti samoreševalne aparate in se umakniti v sveži zračni tok. Za potreben čas do namestitve samoreševalnih aparatov se aktivirajo dihalniki, ki so nameščeni v dostavnih/odvoznih progah in na odkopih (čelu).



Slika 58: Prikaz uporabe dihalnika v primeru izbruha plina

8.1.13 Pnevmatski ranžirni vlak

Ranžirni vlak je namenjen za transport materiala po ravnih in visečih tračnih progah. Na vlaku sta vgrajeni dve pnevmatski dvižni gredi različnih zmogljivosti.



Slika 59: Pnevmatski ranžirni vlak

8.1.14 Pnevmatška potopna črpalka

Pnevmatške membranske potopne črpalke se uporabljajo predvsem tam, kjer zaradi eksplozijske nevarnosti ne pridejo v poštev električne črpalke, ki so danes največ v uporabi.



Slika 60: Membranska potopna črpalka

8.1.15 Stroj ALIVA

ALIVA se uporablja pri jamskih gradnjah za zalivanje profilov z brizganjem betona.



Slika 61: Brizganje betona s strojem ALIVA

8.1.16 Cilindri za odpiranje in zapiranje zračilnih pregrad

Zračilne pregrade se uporabljajo za ločitev in regulacijo zračnih tokov. Skozi zračilne pregrade poteka prehod ljudi, talni prevoz, lokomotivski prevoz po viseči tirnici in gumijasti transport. Poznamo enokrilna vrata, ki se odpirajo ročno, in dvokrilna vrata, ki se odpirajo preko vrvnega ali togega mehanizma, ki ga poganjajo pnevmatski cilindri. Sistem za upravljanje in krmiljenje vrat se napaja iz obstoječega cevovoda.

Za priključkom in pred pripravno grupo, s katero napajamo pnevmatski sistem, mora biti obvezno nameščena tlačna posoda, ki služi za odvajanje kondenza in kot rezervoar komprimiranega zraka, ki zagotavlja dvakratno odpiranje in zapiranje vrat, če v cevovodu ni zraka.



Slika 62: Pnevmski cilinder za zračilne pregrade

8.1.17 Pnevmski vitli

So za lupljenje plasti gumi traka pri izdelavi spojev.

8.1.18 Kretnice

Služijo kot križišče za usmerjanje VDL (viseče diesel lokomotive), ki je namenjena transportu materiala in ljudi po enotirnih visečih progah. Na kretnicah sta dva cilindra: eden služi za usmerjanje kretnice v določeno smer, drugi odpira in zapira varovalo, da prepreči možen padec lokomotive z viseče proge.



Slika 63: Prikazana kretnica z visečo dizel lokomotivo

9 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu je pozornost namenjena predstavitvi, kako se v podzemnih prostorih dovaja komprimiran zrak in se z njim oskrbujejo stroji in naprave.

V podzemnih prostorih se lahko pojavljajo eksplozijske atmosfere zaradi vsebnosti raznih plinov, saj v določenih koncentracijah mešanice zraka in metana lahko nastane eksplozija. Zaradi varnosti se v takšnih območjih uporabljajo naprave na komprimiran zrak. V Premogovniku Velenje se v tako imenovanih nevarnih območjih uporabljajo namesto električnih ventilatorjev in črpalk pnevmatske naprave. Zahtevane varnostne ukrepe pokrivajo rudarski zakoni, ki zajemajo varnost pri delu, varstvo pred požarom, tehnične ukrepe in normative za naprave.

V uvodnem delu diplomske naloge je obravnavana tema o fizikalnih osnovah in vlogi komprimiranega zraka v industrijskih panogah ter da je kljub zelo dragi energiji komprimiran zrak zelo razširjen v vseh panogah. V nadaljevanju diplomske naloge so predstavljeni kompresorji, s katerimi pridobivamo komprimiran zrak, in vrste le-teh ter celoten sklop od kompresorske postaje do razvoda komprimiranega zraka do končnih porabnikov. Opisane so izgube zaradi tlačnih izgub in puščanja zraka.

Na koncu diplomske naloge je prikazan in opisan celoten sistem dovoda s komprimiranim zrakom v podjetju Premogovnik Velenje. Opisana je kompresorska postaja NOP, ki dovaja komprimiran zrak po cevovodih v jamo.

10 LITERATURA IN VIRI

- [1] Katalogi proizvajalcev opreme.
- [2] Institut Jožef Stefan, *Varčno z energijo pri rabi komprimiranega zraka*, Center za energetska učinkovitost, Ljubljana 1999
- [3] A. Leskovar, *Posodobitev kompresorske postaje*, Diplomsko delo, Fakulteta za strojništvo, Maribor 2004
- [4] Bogdan Videmšek, *Spremljanje pretoka materiala in nadzor vsebnosti škodljivih plinov v jamah Premogovnika Velenje*, Diplomaska naloga, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 2010
- [5] Bojan Kulčar, *Optimalna izbira hladilnih naprav za potrebe delovanja visoko temperaturnih toplotnih črpalk in hladilnih naprav*, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Doktorska disertacija, marec 2011
- [6] Matija Tuma, *Energetski stroji in naprave*, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2005
- [7] Zoran Rant, *Termodinamika*, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 2001
- [8] KAESER seminar o stisnjenem zraku, 1. izdaja, 2014