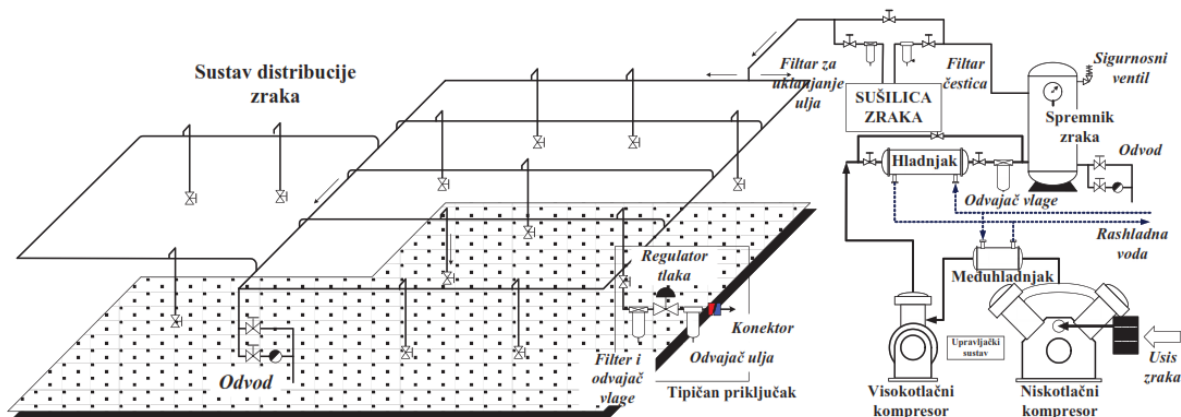


Komprimirani vazduh je siguran i pouzdan nosač energije koji se široko koristi u industriji. U stvari, skoro 70% kompanija koristi komprimirani vazduh u nekim od svojih postrojenja. Komprimirani vazduh stvara se u postrojenja, pružajući korisnicima mnogo mogućnosti za upravljanje upotrebom i kvalitetom vazduha. U proseku, komprimirani vazduh čini oko 10% industrijske potrošnje električne energije. Svestranost, fleksibilnost i sigurnost komprimiranog vazduha kao medija za prenos energije su razlozi njegove važnosti. Ukupni troškovi komprimiranog vazduha za 10 godina mogu se proceniti na: 75% energije, 15% kapitala i 10% održavanja.

Visok udeo troškova za energiju u ceni komprimiranog vazduha ukazuje na to da energetski efikasan sistem može, u pogledu troškova, da bude visoko efikasna mera za poboljšanje performansi sistema, čak i ako blago povećava troškove kapitala. Osnovne komponente sistema komprimiranog vazduha prikazane su na slici. Prisustvo filtera, separatora ulja i ventilacionih otvora ukazuje da su glavni problemi, pored kompresije vazduha, povezani sa uklanjanjem čestica, ulja i vlage. Sistemi za distribuciju vazduha manje-više su uvek dizajnirani da prate položaj krajnjih korisnika. Međutim, nagib cevi za vazduh i njihova veličina moraju biti u skladu sa standardima. Prikazani sistem koristi vodu za hlađenje vazduha, ali upotreba vazduha kao rashladnog medija je takođe uobičajena.



Troškovi proizvodnje komprimiranog vazduha određuju se efikasnošću kompresora i sledećim faktorima:

- pogonski postupci
- konfiguracija kompresora
- pojedinačni upravljački sistemi kompresora
- broj kompresora koji se koriste za zadovoljenje potražnje
- opšti sistem regulacije
- lokaciju mašinske komore kompresora
- Temperatura ulaznog vazduha
- kvalitet rashladnih sistema
- kvalitet održavanja.

## Kompresori

Svaka vrsta kompresora ima prednosti i mane. Generalno gledano, njihove glavne prednosti i glavni nedostaci prikazani su u tabeli ispod.

<i>Svojstvo</i>	<b>Klipni</b>	<b>Rotacijski lopatični</b>	<b>Rotacijski vijčani</b>	<b>Centrifugalni</b>
<i>Razina buke</i>	Glasni	Najmanje glasni	Tihi, ako su ograđeni	Tihi, ako su ograđeni
<i>Veličina</i>	Najmanje kompaktni	Kompaktni	Kompaktni	Kompaktni
<i>Prijenos ulja</i>	Umjeren	Mali - srednji	Mali	Mali
<i>Vibracije</i>	Visoke	Vrlo niske	Vrlo niske	Srednje
<i>Održavanje</i>	Mnogo dijelova	Malo dijelova	Vrlo malo dijelova	Malo
<i>Kapacitet</i>	Mali - veliki	Mali - srednji	Mali - velik	Mali - velik
<i>Tlak</i>	Srednji - vrlo visok	Nizak - srednji	Srednji - visok	Srednji - visok
<i>Efikasnost pri punom opterećenju</i>	Velika	Srednja - mala	Velika	Velika
<i>Efikasnost pri djelomičnom opterećenju</i>	Velika	Slaba, manja od 60%	Slaba, manja od 60%	Slaba, manja od 70%

Energetska efikasnost gore navedenih kompresora je prikazana u tabeli ispod.

TIP KOMPRESORA	Raspon dobave, [l/s]	<b>RASTEREĆENJE</b> Snaga kao % punog opterećenja	<b>PUNO OPTEREĆENJE</b> Snaga potrebna pri 7 bar g (manometar)
Klipni kompresor - jednostupanjski - dvostupanjski	< 50 50 - 3.000	10 - 25 %	jednostupanjski 0,38 - 0,43 kW po l/s dvostupanjski 0,30 - 0,35 kW po l/s
Rotacijski lopatični kompresor	50 - 1.500	30 - 40 %	0,40 - 0,45 kW po l/s
Rotacijski vijčani kompresor	< 600	25 - 60 %	0,35 - 0,40 kW po l/s
Centrifugalni kompresor	600 - 9.000	20 - 30 %	0,30 - 0,35 kW po l/s

Klipni kompresori se mogu delimično uticati na više načina. Oni sa dvostepenim ili trostepenim usisnim ventilima ublažavaju mašinu sekvencijalno, linijski i on/off ventilima ili oni sa petostepenim rasterećenjem najefikasnije rade pri delimičnim opterećenjima. Oni sa promenljivim ulaznim ventilima, koji moduliraju kapacitet u uskom opsegu pritiska, nisu efikasni pri opterećenjima manjim od 70% pune snage.

Modernim vijčanim kompresorima može se upravljati ručno ili automatski za „start-stop“ kontrolu (dakle, kompresor će se zaustaviti nakon određenog vremena bez opterećenja ili će se automatski ponovo pokrenuti kada je potreban komprimovani vazduh). Vreme rada bez opterećenja pomaže u zaštiti motora da se previše ne pokrene. Vijčane mašine takođe mogu biti opremljene modulacionim upravljanjem. Međutim, modulaciju treba koristiti samo ako je opterećenje veće od 70% pune snage. Centrifugalni kompresor pruža odličnu regulaciju i smanjuje potrošnju energije pri delimičnom opterećenju ako se mašina koristi u skladu sa načinom kako je konstruisana. To je između 60% i 100% pune snage, zavisno od aerodinamičkih svojstava vazдушnih cevi.

### Pritisak vazduha

Iako se zahtevi za vazduhom mogu razlikovati od fabrika, najčešći radni pritisak komprimovanog vazduha je oko 6 - 7 barem g. Kako se pritisak povećava, protok se smanjuje (mada to zavisi od pritiska i potrebnog protoka vazduha). Jednačina koja Sledeće odnosi se na količinu vazduha pre i posle kompresije pritiska:

$$\text{Protok komprimiranog zraka} = \text{protok slobodnog zraka} \cdot \frac{\text{početni tlak}}{\text{konačni tlak}}$$

Dostava podleže standardnim uslovima: 20 °C; 50% relativna vlaga i apsolutni vazdušni pritisak od 1.013 bara. Početni i krajnji pritisci u jednačini su apsolutni.

## Prijemnik za vazduh

Glavna funkcija prijemnika vazduha je da deluje kao tampon između fabrike i kompresora, skladišteći veliku količinu komprimovanog vazduha.

Takođe balansira promene pritiska u sistemu razvoda vazduha. Prijemnik za vazduh mora biti postavljen ako ukupna zapremina komprimovanog vazduha nije dovoljno velika za intervale utovara i istovara duže od 45 sekundi. Ovaj interval se može verifikovati jednostavnim eksperimentom tokom pokretanja sistema.

## Uklanjanje vode

Pravilno uklanjanje vode iz komprimovanog vazduha sprečava:

- oštećenja na uređajima za proizvodnju i potrošnju klima uređaja
- korozija opreme.

Voda treba da se odstrani iz rashladnih komora pomoću separatora ili rashladnog sušača. Performanse sistema komprimovanog vazduha obično se poboljšavaju upotrebom sušača, ali s obzirom da su potrebni dodatni kapital i dodatni operativni troškovi (uključujući energiju), sušenje treba da se vrši u onoj meri koja je neophodna za pravilno funkcionisanje opreme i za krajnju upotrebu.

Glavne vrste sušara su:

- Rashladni sušači mogu dostići komprimovanu tačku rose od 5°C, što odgovara standardnoj primeni. Postoji i energetska efikasna verzija koja uključuje sistem upravljanja koji se prilagođava opterećenju hlađenja, odnosno sušenjem potrebnim vazduhom.
- Sušači za sušenje mogu da proizvode gotovo suvi komprimovani vazduh na komprimovanoj tački rose na -70°C. Konstruisani su tako da kada se koristi jedna linija za sušenje vazduha, druga se regeneriše (osuši radi ponovne upotrebe). Sušači za sušenje su podeljeni u dve kategorije - grejane i negrejane. Koriste hemikalije koje apsorbiraju vodu (npr. Silikatni gel) koje mogu apsorbirati vodu iz vazduha. Standardni modeli mogu dodati 15 - 20% ukupnim troškovima sistema za komprimovani vazduh. Međutim, energetska efikasna sušači su na tržištu.
- Membranske sušare postižu veću suvoću vazduha od rashladnih sušača, ali ako su potrebne niže tačke rose (od -40 ° C do -100 ° C), one su manje efikasne od ranije navedenih sušara. Membranske sušare ne treba koristiti za snabdevanje vazduhom u životnim prostorijama ljudi jer mogu umanjiti sadržaj kiseonika u vazduhu, ako nisu posebno konstruisane s tim u vidu.

Za minimalnu potrošnju energije vrsta opreme za uklanjanje vode zavisi od načina korišćenja komprimovanog vazduha:

- visokokvalitetni suvi vazduh (npr. pneumatski nadzor) treba sušiti sa finim filterom

- ako bi samo deo komprimovanog vazduha u fabrici trebao biti visokokvalitetan, treba postaviti malu sušaru vazduha tamo gde je takav vazduh potreban.

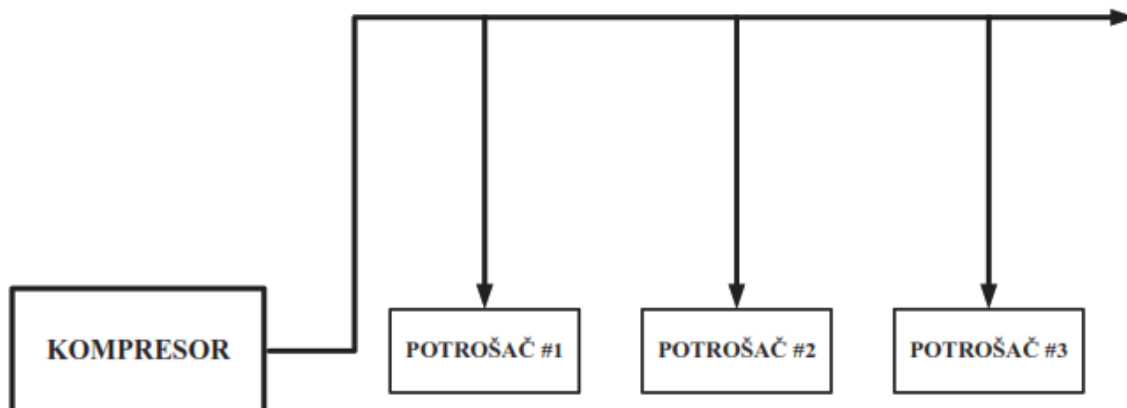
Da biste uklonili značajno više vode iz komprimiranog vazduha nego što je moguće postići naknadnim hlađenjem u komori, potrebna je sušara. Bez obzira na instalisanu sušaru, to će uticati na cenu komprimovanog vazduha, tako da se pravi kvalitet vazduha mora vrlo pažljivo analizirati.

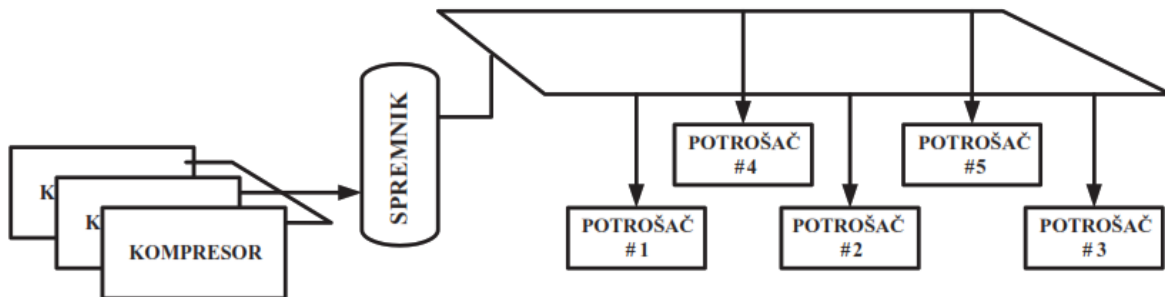
Razmotrimo problem uklanjanja vode na jednostavnom primeru. Standardni ambijentalni vazduh (20 ° C; 50%; 1.013 bara) sadrži 0,00726 kilograma vode po kilogramu suvog vazduha.

Do sada je voda u obliku vodene pare. Ako kompresor preradi 1000 litara u sekundi takvog vlažnog dovodnog vazduha, ulaz i izlaz komprimovanog vazduha će sadržati 31,1 kilograma vode na sat. Ako se vazduh komprimuje apsolutno do 8 bara, voda će delimično ostati u obliku vodene pare, a ostatak vode će se kondenzovati. Povećanje temperature vazduha tokom kompresije sprečava kondenzaciju, ali kada vazduh prođe kroz komoru za hlađenje, kondenzuje se velika količina vodene pare. Tipične temperature vazduha na izlazu iz kompresora su oko 35°C, ali je pritisak vazduha mnogo viši od onog u okruženju. Zasićena apsolutna vlažnost vazduha iznosi 25°C, 8 bara, a 100% je 0,00440 kg / kg pri gustini od 9,0192 kg / m<sup>3</sup>. To znači da će se kondenzovati 0,00726 - 0,00440 = 0,00286 kg / kg vodene pare. Za isto snabdevanje, to znači da će se nakon hlađenja iz komprimovanog vazduha ukloniti 12,25 kg vode.

## Cevi

Dovod vazduha kroz jednu cev tipičan je za male sisteme komprimovanog vazduha. Obično se koristi prstenasti sistem glavnih cevi koji omogućava izolaciju manjih delova sistema za dovod vazduha bez prekida isporuke drugim potrošačima.





Mali prečnik cevi može da prouzrokuje velike brzine vazduha, što rezultira većim padom pritiska zbog trenja unutar cevi.

Većina pneumatskih uređaja zahteva najmanje 6 bara za maksimalnu efikasnost rada. Distribucija vazduha treba da se vrši sa minimalnim padom pritiska, npr. Oko 0,50 bara, uključujući sve priključke i fitinge. To će dovesti do brzine komprimovanog vazduha od 6 - 10 m/s.

#### Ventilacija mašinske sale kompresora

Temperatura prostorije kompresora mora biti niža od 40 ° C. Ventilacioni sistem komore kompresora treba proveriti jednostavnim merenjem temperature vazduha u kompresorskoj prostoriji i trenutnim uslovima izvan i unutar prostorije (temperatura okoline, opterećenje kompresora, zatvorena ili otvorena vrata itd.).

#### Analiza performansi

Za postojeći sistem komprimovanog vazduha najpouzdaniji i najpotpuniji pokazatelj performansi je **količina energije koja je potrebna za proizvodnju jedinične količine komprimovanog vazduha**. Jedinstvena količina komprimovanog vazduha se obično izražava kao dovod (FA) u standardnim uslovima: 20 ° C, 50% vlage, 1.013 bara. Razlog je taj što je najlakše izmeriti protok vazduha na ulazu u kompresor. Ovaj indikator treba izračunati dnevno za veće jedinice na sledeći način:

$$PI_1 = \frac{\text{dobava (FA)}}{\text{uložena energija}} \quad [\text{m}^3 \text{ FA} / \text{kWh}].$$

Drugi važan pokazatelj performansi je jedinična **cena komprimovanog vazduha**. Dominantno učešće u ceni proizvodnje komprimovanog vazduha je cena električne energije. Međutim, troškove održavanja ne treba zanemariti.

Stoga se ovaj indikator može izračunati na mesečnom nivou i definiše se na sledeći način:

$$PI_2 = \frac{\text{dobava (FA)}}{\text{cijena električne energije + troškovi održavanja}} \quad [\text{m}^3 \text{ FA} / \text{USD}]$$

Faktori zbog kojih se ovi pokazatelji tokom vremena menjaju su brojni. Neki od njih su:

- povećana nekontrolisana pražnjenja
- promena cene električne energije (PI2)
- povećani troškovi održavanja (pogonski materijali, rezervni delovi itd.)
- značajne promene u obimu proizvodnje.

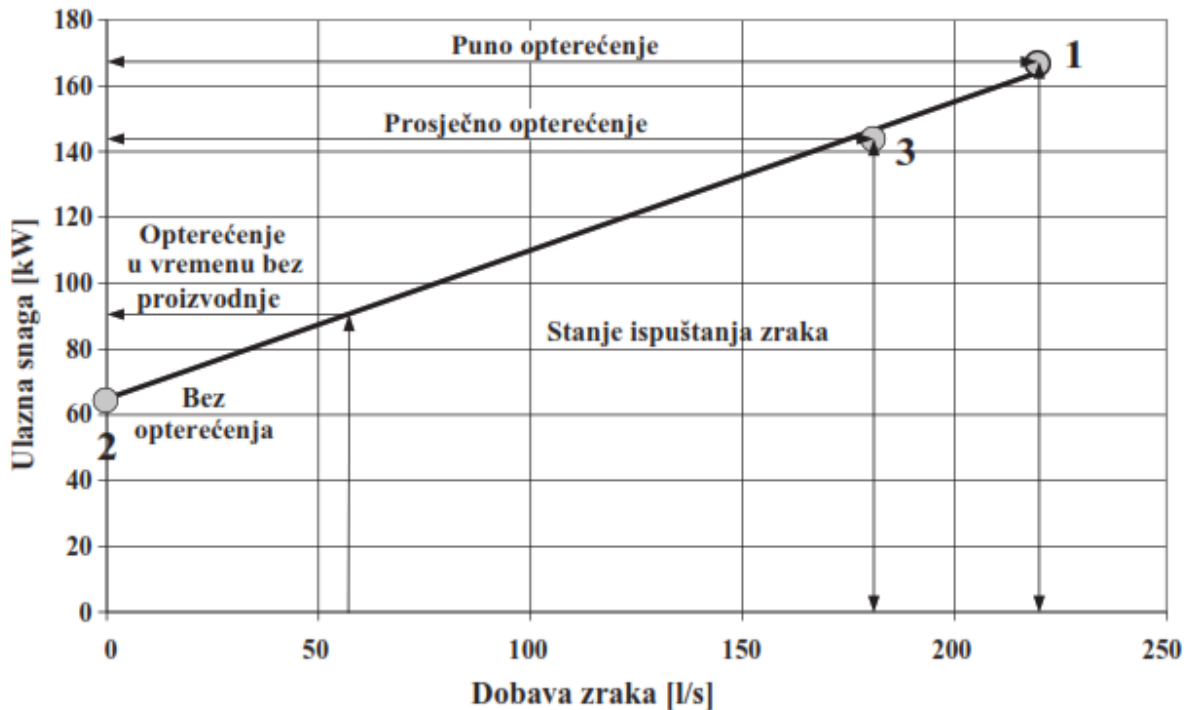
Praćenje ovih pokazatelja je deo upravljanja energijom i uključuje preduzimanje mera kako bi se zadržali u prihvatljivim granicama. Ostali faktori koji mogu uticati na promene performansi i koje treba proveriti su:

- da li je moguće smanjiti pad pritiska na sve elemente sistema
- da li je radni pritisak optimalan ili se može smanjiti
- da li je merenje potrošnje komprimovanog vazduha odgovarajuće
- da li je kvalitet vazduha zadovoljavajući
- da li je moguće obnavljanje otpadne toplote
- da li se održavanje vrši onako kako je preporučeno.

Pored gore navedenih pokazatelja performansi, važno je pratiti i efikasnost kompresora. Efikasnost se neće značajno izmeniti za odgovarajuće opterećenje ako se preventivno održavanje sprovede prema preporuci proizvođača.

Dijagram performansi kompresora

Dijagram performansi kompresora pokazuje dovod [l/s] u odnosu na snagu kompresora [kW]. Maksimalna nominalna količina vazduha (FAD, Free Air Delivery) je predviđena isporuka kompresora [l/s] i može se naći u tehničkim priručnicima. Obično se navodi u standardnim uslovima (npr. 1,013 bara apsolutno, 20°C i relativna vlažnost oko 50%). Vrednosti ulazne snage i maksimalnog dovoda vazduha prikazane su u tački. Nulta struja vazduha prikazana je u tački 2, a stvarna radna tačka je tačka 3 na slici 10-4.



## Merenja

Merenja u sistemu komprimovanog vazduha postavljena u industrijskim uslovima prevashodno se odnose na kompresore. Sistem za distribuciju vazduha je raznolik, a protok vazduha u delovima sistema se s vremenom značajno menja. Zato merenje određenih potrošača ili grupa korisnika može biti vrlo zahtevan i ponekad beskoristan posao (stalno paljenje i gašenje). Kada je u pitanju mreža za distribuciju vazduha, najvažnije je redovno vršiti inspekcijske preglede i utvrđivati moguće curenje. Međutim, merenje pritiska ili pada pritiska preko grana sistema može biti vrlo dobar pokazatelj pražnjenja i protoka vazduha u granama. Jedan od najvažnijih faktora koji utiče na potrošnju energije u proizvodnji komprimovanog vazduha je pritisak curenja koji određuju krajnji korisnici i hidrauličke karakteristike distributivne mreže.

Kompresori su glavni potrošači energije u sistemu komprimovanog vazduha. Savremeni kompresori omogućavaju merenja trenutne potrošnje električne energije, pritiska curenja, efikasnosti, parametara usisa, vremena vožnje itd. Kada je reč o ovim pojedinačnim merenjima, analiza takođe uključuje proveru da li su podaci u granicama proizvođača. Ovo uključuje temperaturu ulja u kompresoru, hlađenje itd.

Merenja koja se vrše u distributivnoj mreži su sledeća:

Početni pritisak u svakoj grani koji predstavlja više od 10% ukupnog protoka komprimovanog vazduha. Procena protoka po granama je moguća u skladu sa prečnikom cevi. Poznato je da se prečnik utvrđuje na osnovu preporučenog protoka u cevima.

Pritisci u najudaljenijim tačkama grana. Vrednosti izmerene kao što su gore navedene određuju maksimalne padove pritiska po grani i najbolji su pokazatelj stanja u određenom delu sistema. Poželjno je da se ta merenja izvrše za uobičajeni obim proizvodnih aktivnosti. Takođe je važno izmeriti ove pritiske ne samo kada je proizvodnja na maksimumu, već i kada je nema. Pad pritiska kada nema proizvodnje može biti odličan pokazatelj pražnjenja ili loše regulacije proizvodnih mašina.

### A) Snaga

Snaga se meri za određivanje godišnje potrošnje električne energije sistema komprimovanog vazduha na osnovu broja radnih sati.

Obično se kompresor kreće u ciklusima između uslova opterećenja (povećava se manometar izlaznog pritiska) i istovara (kalibra izlaznog pritiska pada). U oba slučaja, ampermetar za spajanje može se koristiti za merenje struje u svakoj od tri faze, računanjem prosečne vrednosti za opterećenje i rasterećenje ( $I_{ave}$ ). Snaga trofaznog motora za uslove opterećenja i rasterećenja može se izračunati pomoću jednačine:

$$P \text{ [kW]} = \sqrt{3} \cdot I_{ave} \cdot FS \cdot \frac{U}{1.000}$$

Ako kompresor nema ciklus, sledeći postupak se može koristiti za postizanje uslova opterećenja i rasterećenja:

- uslovi punog opterećenja: otvorite izduvne ventile na prijemniku za vazduh i izmerite snagu koju kompresori troše dok se pritisak povećava.
- bez uslova opterećenja: zatvorite ventil između kompresora i prijemnika vazduha i izmerite snagu. Važno je osigurati da ovi testovi ne utiču na proizvodnju.

### B) Pritisak

Merenje pritiska se vrši da bi se stvorila povratna veza za regulaciju i za određivanje pada pritiska kroz sistem. Potreban je kalibrisan anometar. Potrebni nivoi pritiska moraju uzeti u obzir gubitke sistema zbog sušara, separatora, filtera i cevi.

Treba izvršiti sledeća merenja pritiska:

- na ulazu kompresora (ulazni filter)
- diferencijala kroz vazdušni separator i ulje za vijčani kompresor sa podmazivanjem
- u međufazama višestepenih mašina
- diferencijali pritiska, uključujući rashladne komore, opremu za obradu (sušare, filteri, itd.) i razne tačke u distributivnom sistemu.

### C) Protok

Merači protoka su potrebni za merenje ukupnog protoka i utvrđivanje potrošnje vazduha. Potrebno je izmeriti protok:

- za vreme različitih promena
- posle primene mera za poboljšanje energetske performansi
- za ispuste tokom perioda kada nema proizvodnje.

Treba da se koriste maseni merači protoka za kompenzaciju promena temperature i pritiska i, ako je moguće, treba da mogu da mere snagu svakog pojedinačnog kompresora u sistemu. Maseni protok se zasniva na standardnim referentnim uslovima koje treba proveriti za svaki korišćeni instrument.



#### D) Temperatura

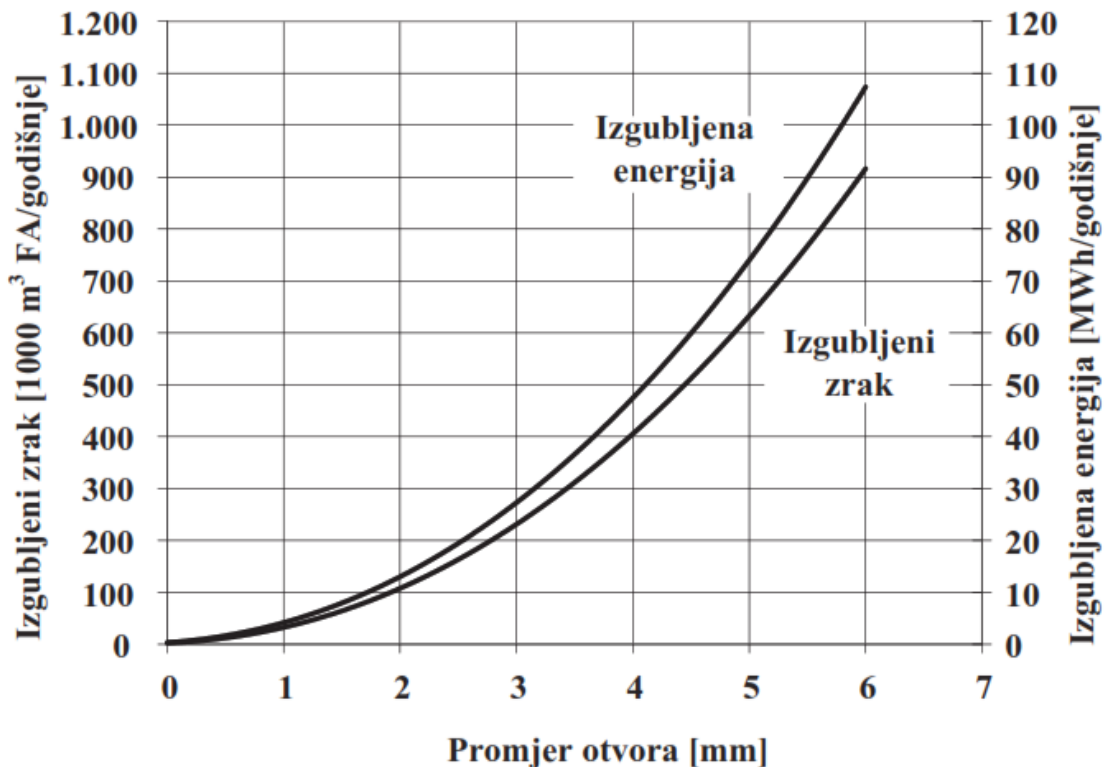
Merenja temperature pomažu u utvrđivanju da li oprema ispravno radi. Generalno, oprema koja je toplija od navedenih parametara zahteva servisiranje. Treba izvršiti sledeća merenja temperature:

- komore za hlađenje i međuhlađenje, ulazne i izlazne temperature
- ulazne i izlazne temperature vode (ako se koristi vodeno hlađenje)
- ulazne temperature vazduha.

#### E) Određivanje ispusta komprimovanog vazduha

Broj nekontrolisanih procepa i rupa u sistemu je veliki. Mala ispuštanja je vrlo teško primetiti, ali se množe u velikom broju, uzrokujući gubitak značajne količine vazduha iz sistema bez ikakve kontrole. Na slici je prikazana zavisnost pražnjenja dovodnog vazduha i utrošene energije od prečnika otvora cevi. Ovaj primer je dovoljno ubedljiv da ukaže na važnost uklanjanja neželjenih ispuštanja iz instalacija.

Najbolji način za kvantifikaciju pražnjenja u sistemu komprimovanog vazduha je njegovo merenje. Dve metode su dovoljno definisane i nisu previše komplikovane i zbog toga se mogu koristiti kao redovan proces u industriji. Ono što je zajedničko za oba ispitivanja je da se mogu izvoditi samo u periodima bez proizvodnje.



#### a) TEST OPTEREĆENJA/RASTEREĆENJA

Procedura je sledeća.

- Isključiti sve mašine i opremu koja koristi komprimovani vazduh.

- Izaberite jedan od kompresora za testiranje i zatvorite ispusne ventile ostalih.
- Pokrene se odabrani kompresor i pogoniti ga pod punim linijskim pritiskom. Ako kompresor ne može da dostigne punu vrednost linijskog pritiska samostalno, tada pražnjenje premašuje puni kapacitet tog kompresora. Moraju se pokrenuti dodatni ili veći kompresori.
- Tokom što više ciklusa zabeležiti prosečno vreme opterećenja ( $T_{OPTER}$ ) i prosečno vreme opterećenja ( $T_{RASTER}$ ). Ispuštanje vazduha prouzrokuje pad pritiska i kompresor(i) će se ponovo opteretiti.
- Ukupni ispus može se izračunati pomoću sledeće jednačine:

$$V_{ISPUS} [l/s] = V_{CC} [l/s] \cdot \frac{T_{OPTER}}{T_{OPTER} + T_{RASTER}}$$

U jednačini  $V_{CC}$  označava dobavu ('vazdušni kapacitet') kompresora. Ako se kompresor pogoni regulacijom uključeno/isključeno,  $V_{CC}$  predstavlja nazivne dostavu. Ali, ako se koristi modulacija regulacija, zavisnost prosečne snage i dobave mora biti poznata. Prosečna snaga tokom testiranja može se proračunati ili meriti.

## (b) TEST UPUMPAVANJA

Taj test pretpostavlja instalaciju manometra nizvodno od prijemnika i proračun zapremine sistem koji se testira.

Postupak je sljedeći.

Proračunati zapreminu testiranog sistema (glavni vazdušni vod i prijemnici). Za taj proračun mogu se koristiti nacrti sistema ili se može sprovesti fizička inspekcija.

Nadpritisni sistem do pogonskog pritiska ( $p_1$ ) i potom zatvoriti izolacioni ventil.

Zabeležiti vreme ( $\tau$ ) potrebno da pritisak padne sa  $p_1$  na  $p_2$ .

Ispust se može računati kao:

$$V_{ISPUS} = \frac{V_{GLAVNO}}{\tau} \cdot \frac{p_1 - p_2}{P_B}$$

Poznavanjem ispusta koji se proračunavaju primenom bilo kojeg od prikazanih testova moguće je izračunati njihovu cenu. Naravno, najinteresantnije je proračunati cenu ispusta u jednoj godini.

Za taj je proračun potrebno poznavati ukupnu električnu energiju koju je utrošio sistem komprimiranog vazduha i broj radnih sati. Te vrednosti se mogu koristiti kod proračuna prosečne snage kompresorske sobe. Uspostavljanjem odnosa ulazne snage i dobave (isporučenog vazduha) za sve kompresorske sobe koje smo testirali, moguće je odrediti prosečan protok dobavljenog vazduha. Ako označimo tu vrednost sa  $V_{C/A}$ , postotak ispusta, gubitak je kako sledi:

$$L_{C/A} = \frac{V_{ISPUST}}{V_{C/A}} \cdot 100\%.$$

## Mogućnosti poboljšanja radnih parametara

Najčešći razlog povišenja troškova za komprimirani vazduh su neregulirani ispusti vazduha i neodgovarajuće iskorištavanje. Sve je to integralan deo aktivnosti vezanih za održavanje. Sljedeća važna grupa aktivnosti u pomašinaenju, gde postoje mogućnosti za poboljšanje radnih parametara, vezana je za poboljšavanje pogonske prakse sistema komprimiranog vazduha.

## Pogon i održavanje

Održavanje je ključno u održavanju troškova sistema komprimiranog vazduha na minimumu. To uključuje:

(a) bolje vođenje pogona:

- ispuštanja iz cevi mogu se identifikovati traženjem 'šištajućih' zvukova tokom vremena kada nema proizvodnje
- trošak popravka ispusta je mali u odnosu na potrošenu energiju
- spojnice s pukotinama moraju biti zamenjene novim
- treba popraviti ili zameniti neispravne veze s krajnjim potrošačima
- osigurati da odvod vode na prijemniku i filteri rade ispravno ili postaviti automatske odvodne ventile

(b) održavanje kompresora:

- treba popraviti ili zameniti neispravne veze s krajnjim potrošačima
- ulje za podmazivanje smanjuje trenje i sprečava habanje delova u dodiru - jedinice treba redovno održavati i koristiti samo ulje koje je preporučio proizvođač
- filteri uklanjaju nečistoće, vodu i ulje iz vazduha - i moraju se redovno čistiti ili menjati jer filteri postanu
- prljavi vrlo brzo i stvaraju suvišne padove pritiska

(c) poboljšano korišćenje vazduha:

- izbegavati vazdušne mlaznice (engl. air blasts) za čišćenje, sušenje ili pomicanje proizvoda jer nisu prikladne
- ne koristiti komprimirani vazduh kao vazduh za čišćenje - bolje je koristiti duvaljke.

## Regulacioni sistemi

### A) Kompresori

Dobra regulacija je najbolji način za upravljanje pogonom. Moderni regulacioni sistemi mogu ukupne troškove proizvodnje komprimiranog vazduha sniziti za 5 - 20% uz relativno male kapitalne izdatke. S obzirom na to da su pogonski uslovi ponekad vrlo varijabilni (više nego što je pretpostavljeno tokom projektovanja procesa), važno je proveriti obavlja li postojeći regulacioni sistem pravilno svoju zadatak. Izlaz kompresora treba biti regulisan kako bi bio usklađen s potrošnjom.

To se može izvesti na dva načina:

- merenjem pritiska u prijemniku, tako da je kompresor u punom pogonu dok pritisak u prijemniku ne dosegne definisanu granicu, nakon čega se kompresor gasi ili 'rasterećuje' - ovo je najčešća metoda.
- prilagođavanjem protoka vazduha na ulazu kompresora korišćenjem ventila za smanjenje protoka vazduha često rezultira time da kompresor prelazi u stanje rasterećenja pri oko 20 - 60% punog opterećenja, zavisno o tipu kompresora.

Troškovi energije višekompresorskog sistema mogu biti visoki ako se svi kompresori opterećuju ili rasterećuju istovremeno. Regulacija sekvenciranjem dostupna je kod većine proizvođača kompresora. Proizvođači pružaju automatsku regulaciju kako bi se postigao optimalan pogon komprimovanog vazduha osiguravajući:

- tačan broj kompresora u pogonu (npr. jedan kompresor je na punom opterećenju pre pokretanja sljedećeg)
- tačni tip kompresora u pogonu (npr. efikasniji kompresor je bolji u pogonu od manje efikasnih kompresora) za određenog potrošača.

Današnja tehnika uvek uključuje frekventni regulator za upravljanje opterećenjem, prilagođavajući brzinu kompresora trenutnim potrebama procesa koji koristi komprimovani vazduh. S energetskeg gledišta, taj sistem regulacije je najbolji. Regulatori se mogu i programirati tako da osiguraju da kompresori koji koriste više energije tokom uslova rasterećenja ostanu što opterećeniji.

Stvarnim primerom prikazaćemo mogućnosti modernih automatskih regulacionih sistema. U tom primeru u pogonu je sedam kompresora s raznim kapacitetima u mreži, pri čemu se koriste za opskrbljivanje proizvodnog procesa vazduhom. U prve dve smene (6:00 - 22:00 h), proizvodni proces provodi se pod punim kapacitetom, a potrebe za komprimiranim vazduhom izražene su u snazi kompresora koje variraju od 690 do 1125 kW. Kompresori br. 1 - 3 su veći od drugih s obzirom na svoj kapacitet i koriste se za pokrivanje bazne potrošnje komprimiranog vazduha. To je razlog zašto su postavljeni na više pritiske isticanja, što im omogućava da stalno ostaju u pogonu. Ukupna snaga je 690 kW.

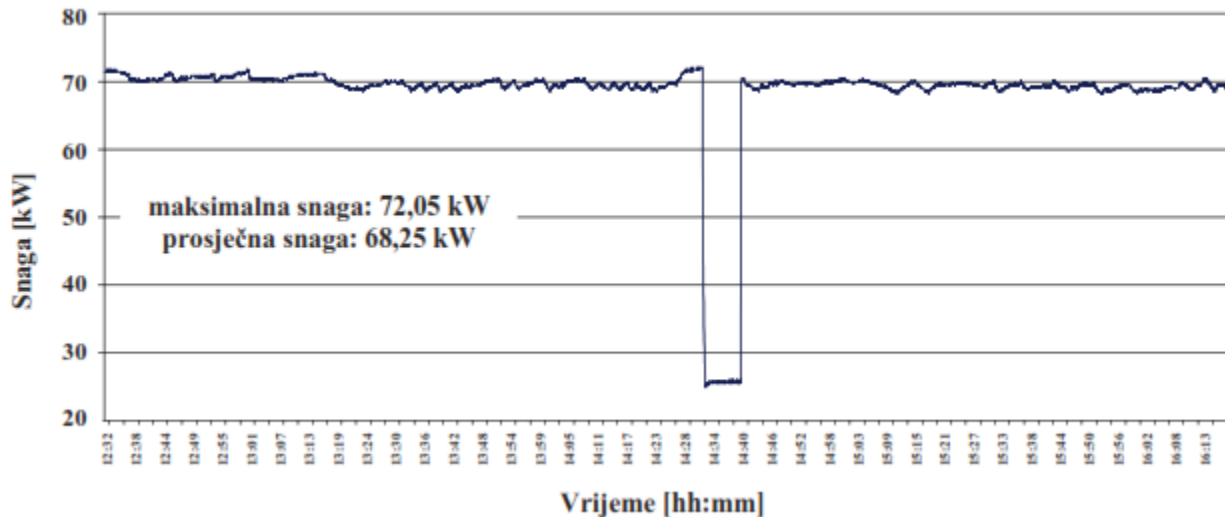
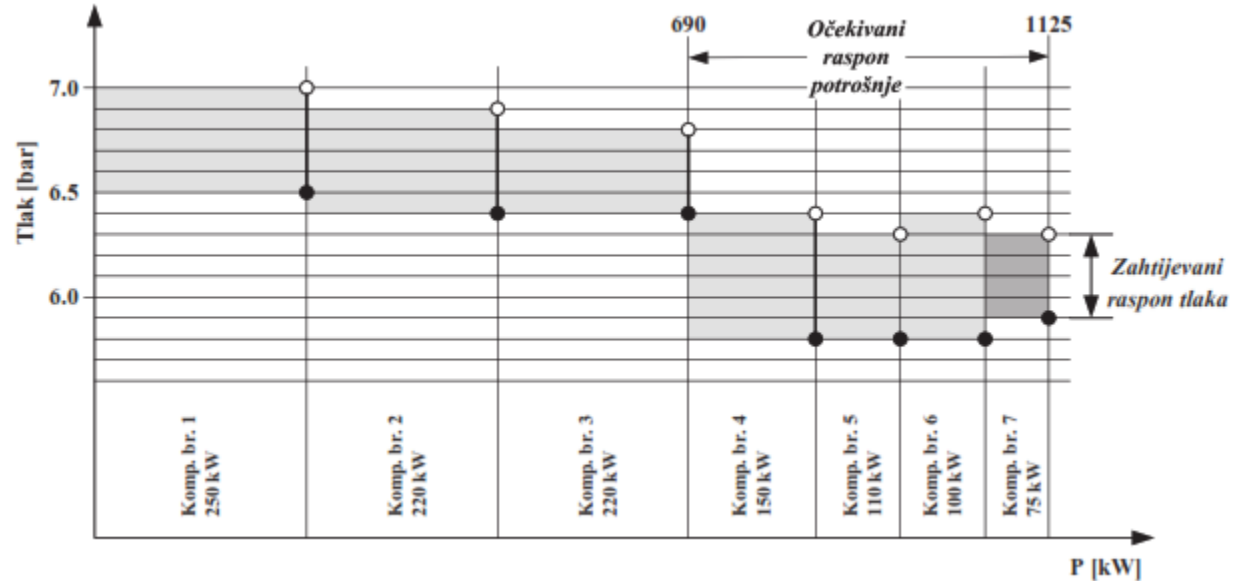
Ukupna snaga kompresora br. 4 - 7 je 435 kW. Kompresor br. 7 je postavljen da bude u pogonu u rasponu od 5,9 do 6,3 bar, što je i zahtevani raspon pritisaka. Za dnevnu proizvodnju (od 6:00 do 22:00 h) koristi se prikazana pogonska shema. Kompresori br. 6 i 7 imaju vremensku logiku isključivanja koja se aktivira 10 minuta nakon rasterećenja motora kompresora. Na taj način može se očekivati da će u slučaju smanjene potrošnje komprimiranog vazduha samo kompresor br. 5 biti u stanju rasterećenja, a kompresori br. 6 i 7 u rasterećenju samo ponekad. Kompresor br. 4 je postavljen na nešto viši pritisak isticanja (6,4 bar) i stoga nema vremensku logiku isključivanja.

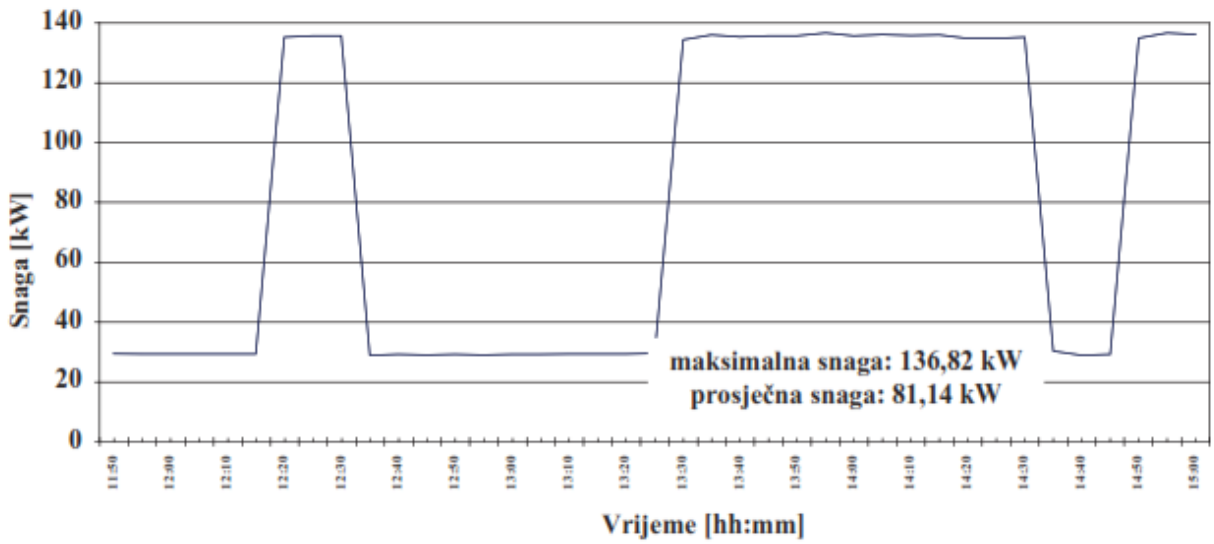
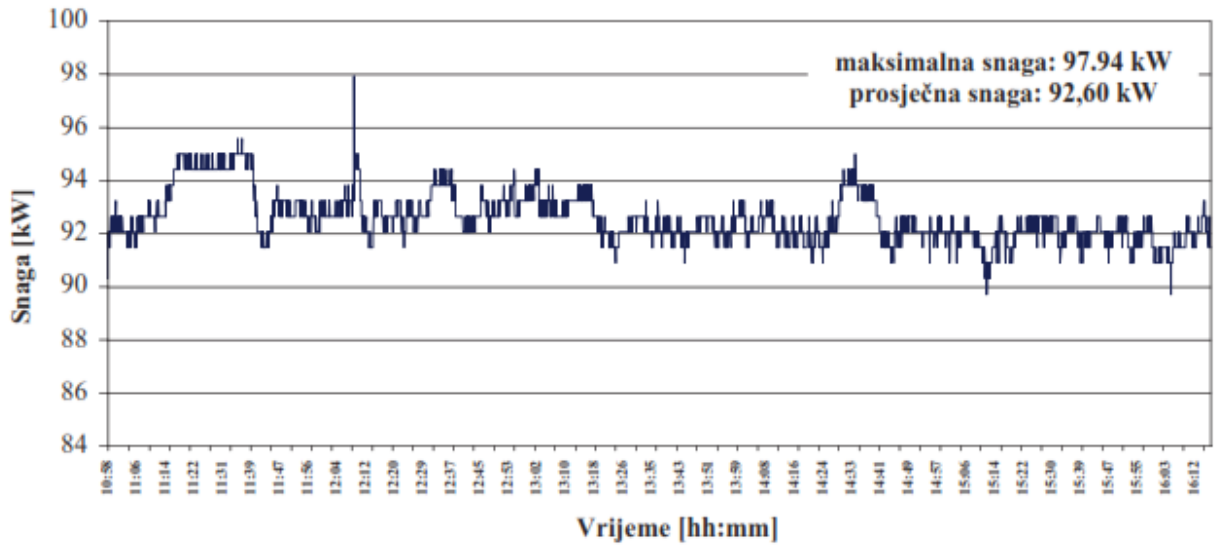
Slike prikazuju promenu snage kompresora br. 4, 6 i 7. Može se videti da su kompresori br. 6 i 7 bili u pogonu samo pod uslovima opterećenja (osim kompresora br. 7 koji se jednom isključio). Samo kompresor br. 4 ima veća razdoblja opterećenja i rasterećenja. Čak je i kompresor br. 5 bio uglavnom u opterećenju jer je postavljen na nešto viši pritisak od kompresora br. 4.

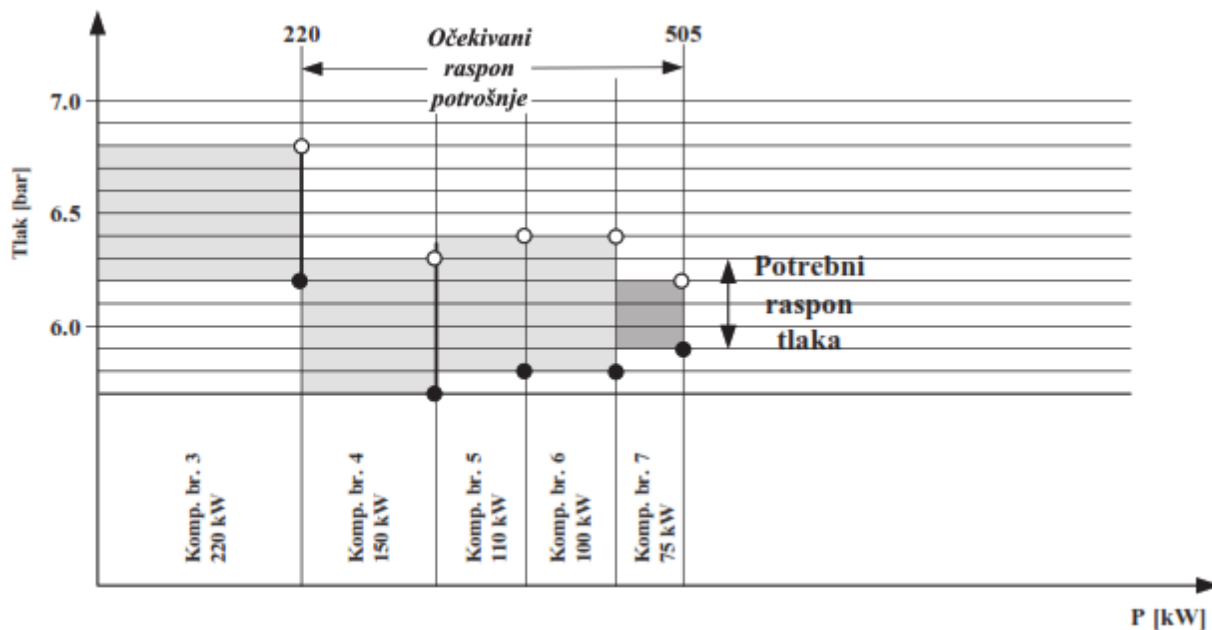
Na taj način rad u rasterećenju uključuje samo jedan kompresor srednje snage. Prije nego je primenjena takva pogonska strategija, nekoliko kompresora je istovremeno bilo u rasterećenju što, poznavajući snagu

kompresora u rasterećenom pogonskom načinu rada od 30% nazivne snage, predstavlja znatan gubitak energije.

Potrošnja komprimiranog vazduha tokom noćne smene (22:00 - 6:00 h) je mala, a očekivana snaga kompresora u raspona od 220 do 505 kW. Manja potrošnja omogućava snižavanje pritiska za oko 0,1 bar, čime se smanjuju i gubici u glavnim cevovodima. Regulacija pritiska postavljena je u opseg od 5,9 do 6,2 bar (Slika 10-10). Po noći, kompresori br. 1 i 2 su jednostavno isključeni.







## B) Kontrola standarda kvaliteta komprimiranog vazduha

Međunarodna norma za kvalitetu komprimiranog vazduha je ISO 8573-1. Tom normom se pokrivaju brojne klase kvaliteta, definišući preporučenu maksimalnu količinu dopuštene prašine, vode i ulja po kubnom metru komprimiranog vazduha. Specifikacija visine onečišćenosti koju određuje ta norma prikazana je u Tabli.

Klasa	Čvrste čestice [Maksimalni broj čestica po m <sup>3</sup> ]			Rosište vode pri 7 bar g [°C]	Ulja (uključujući paru) [mg/m <sup>3</sup> ]
	0,1 - 0,5 [µm]	0,5 - 1,0 [µm]	1,0 - 5,0 [µm]		
1	100	1	0	-70	0,01
2	100.000	1.000	10	-40	0,1
3	-	10.000	500	-20	1
4	-	-	1.000	3	5
5	-	-	20.000	7	-
6	-	-	-	10	-

Komprimovani vazduh sadrži kontaminante poput: (a) vodene pare, (b) kondenzata, (c) čestica koje mogu biti leteće i/ili taložne, (d) ulja u gasovitom ili tečnom stanju koje je kompresor usisao iz atmosfere ili dodao tokom kompresije i (e) mikroba. Tretiranje vazduha zavisi od potrebama korisnika. Međutim, preporučuje se slediti stvarne potrebe krajnjih korisnika umesto postavljanja sofisticiranije i skuplje opreme za prečišćavanje vazduha. Uopšteno, preporučeni standard za razne primene u proizvodnji prikazan je u Tabeli 10-4.

Primjena	Tipična klasa kvalitete		
	<i>Ulje</i>	<i>Nečistoće</i>	<i>Voda</i>
Miješanje zraka	3	5	3
Zračni ležajevi	2	2	3
Zračno umjeravanje	2	3	3
Zračni motori	4	4 - 1	5
Strojevi za cigle i staklo	4	4	5
Čišćenje strojnih dijelova	4	4	4
Građevinarstvo	4	5	5
Prijenos, zrnati proizvodi	3	4	3
Prijenos, praškasti proizvodi	2	3	2
Fluidna logika, električni krugovi	4	4	4
Fluidna logika, senzori	2	2 - 1	2
Ljevački strojevi	4	4	5
Hrana i piće	2	3	1
Ručni zračni alati	4	5 - 4	5 - 4
Strojni alati	4	3	5
Rudarstvo	4	5	5
Proizvodnja mikroelektronike	1	1	1
Strojevi za pakiranje i tekstil	4	3	3
Procesiranje fotografskog filma	1	1	1
Pneumatski cilindri	3	3	5
Pneumatski alati	4	4	4
Instrumenti za procesnu regulaciju	2	2	3
Bojanje (sprejanje)	3	3	3
Pjeskarenje	-	3	3
Strojevi za varenje	4	4	5
Općenito zrak u radionici	4	4	5

### C) Kontrola kvaliteta rashladne vode

Ako rashladni sistem kompresora koristi vodu, vrlo je važno održavati svojstva vode u rasponu koji je definisao proizvođač. Problem onečišćenja površina za prenos toplote može znatno smanjiti efikasnost kompresora i povećati

potrošnju energije za isti protok komprimiranog vazduha. Postupno će se smanjiti i protok. Glavni problem uticaja kvaliteta vode na proces hlađenja kompresora je da se onečišćenje događa postupno i tokom dugog razdoblja, polako menjajući performanse kompresora. Sličan problem se pojavljuje u mašinama hlađenim vazduhom ako rashladni sistem postane nečist.

Ako ne postoje preporuke proizvođača za kvalitet rashladne vode, mogu se koristiti podaci iz tabele



Predmet	Jedinica	A	B
pH pri 25 °C	-	6,5 - 8,0	6,5 - 8,0
Vodljivost pri 25 °C	μS/cm	< 800	< 200
Ukupna tvrdoća kao CaCO <sub>3</sub>	ppm	< 200	< 50
M-alkalnost kao CaCO <sub>3</sub>	ppm	< 100	< 50
Ioni klora, Cl <sup>-</sup>	ppm	< 200	< 50
Ioni sumporne kiseline, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	ppm	< 200	< 50
Ukupno iona, Fe	ppm	< 1,0	< 0,3
Silikat, SiO <sub>2</sub>	ppm	< 50	< 30
Ioni sumpora, S <sup>2-</sup>	ppm	0	0
Ioni amonijaka, NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	ppm	0	0

## Mere poboljšanja radnih parametara

### A) Smanjenje ispuštanja komprimovanog vazduha

Za sada smo pomenuli problem ispuštanja nekoliko puta i istaknuli potrebu za njegovim smanjenjem ili uklanjanjem. To treba biti kontinuirani proces i integralni deo uobičajenog održavanja.

### B) Sistem regulacije

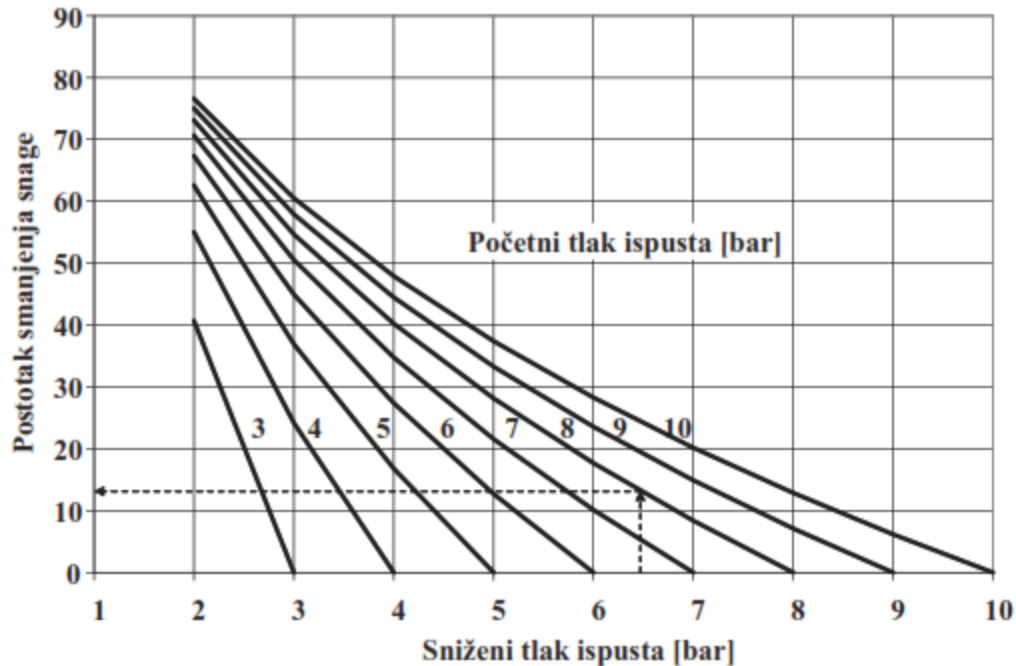
Moderna tehnika danas nudi mnogo mogućnosti za poboljšanje regulacije postojećih sistema komprimiranog vazduha. Često se čak ni postojeći regulacioni sistem ne koristi na optimalan način. Uzimajući u obzir činjenicu da moderni regulacijski sistemi nisu skupi u odnosu na troškove energije sistema komprimiranog vazduha, potencijal za nadogradnju regulacionog sistema treba ispitati kada postoje i najmanje promene u sistemu.

### C) Pritisak isticanja

Svaka mašina koji koristi komprimovani vazduh ima određeni radni pritisak i potrebne veze sa sistemom komprimovanog vazduha. Pritisak treba biti u određenim granicama, npr između 3 i 5 bar g ili sl. Na žalost, projektanti često počnu od najvišeg pritiska i dodaju pridružene gubitke, neopravdano time povisujući početni pritisak kompresorske sobe kako bi smanjili rizike. Praksa je pokazala da se pritisak isticanja nepotrebno podiže i potom tek pre ulaska u mašinu (krajnjeg potrošača) snižava. Slika 10-11 prikazuje udeo smanjene snage kompresora u odnosu na sniženi pritisak isticanja.

Razmotrimo značenje tog dijagrama primerom.

Na Slici 10-11 pronađite sniženi pritisak isticanja na apscisi (x-osi), ucrtajte okomitu liniju na krivulju koja prikazuje početni pritisak isticanja i nacrtajte (iz tačke preseka) vodoravnu liniju kako biste očitali aproksimovano smanjenje kW na ordinati (y-osi). Postotak smanjenja snage se proračunava s obzirom na početni pritisak isticanja. Za spomenute uslove, uštede koje su realizovane snižavanjem pritiska isticanja sa 8 na 6,5 bar je 13%.



#### D) Rekuperacija otpadne toplote

Postoji potencijal za iskorištavanje 50 do 90% toplote koja se uklanja hlađenjem vazduha tokom kompresije. Najviše energije je moguće rekuperirati vijčanim kompresorima, a najmanje turbokompresorima. Međutim, realistična rekuperacija toplote može se ekonomski ugraditi za do oko 30% ukupne iskorišćene energije za komprimiranje vazduha.

Ta energija može se koristiti za niskotemperaturne primene u industriji (zagrevanje napojne vode kotla, potrošnu toplu vodu i sl).

### 10.4. Nadziranje radnih parametara

Stalno praćenje dva glavna pokazatelja radnih parametara, kako je definisano ranije, je glavno za pravilan nadzor sistema i poduzimanje adekvatnih mera u slučaju varijacija u odnosu na zadane ciljane vrednosti. To podrazumeva merenja električne energije i vazдушnih tokova. Moderni kompresori mere te vrednosti kao i one koje koristi operator, iako se mereni pokazatelji često ne obrađuju dalje od tih tačaka. Zadatak menadžmenta je samo odrediti postupke za prikupljanje podataka i njihovu obradu te određivanje korektivnih mera ili pokretanje preventivnog održavanja kada pokazatelji radnih parametara nisu u definisanim granicama.

Moderni elektronički sistemi nadzora prate trenutni pogon i, ako bilo što krene po zlu, signalizuju abnormalnosti i gase mašinu pre nego se dogodi šteta. Uređaji za elektronički nadzor mogu se postaviti i na postojeće kompresore.

#### Parametri koje treba nadzirati

Podaci koji moraju biti poznati za pravilno praćenje sistema komprimovanog vazduha su sledeći:

- potrošnja energije [kWh / TI] (TI je vremenski interval: sat; dan; nedelja itd)
- dobava vazduha, [m<sup>3</sup>/TI] (proračunava se za standardni vazduh za 20 °C, 1,013 bar i 50%)

- prosečni parametri okolnog vazduha
- pritisak isticanja komprimovanog vazduha, [bar]
- pritisak na tački korišćenja kako bi se odredio pad pritisa u celom sistemu, [bar]
- parametri vode ako je sistem hlađen vodom
- vremena pogona
- kvalitet vazduha.

Kao dodatak tim parametrima, koji su nezaobilazni za određivanje energetske efikasnosti pogona sistema komprimovanog vazduha, potrebno je osigurati i nadzor drugih vrednosti koje spadaju u područje održavanja (razina ulja i pritisa, temperatura ulja, pad pritisa na filterima itd). Ta merenja daju mogućnost provere uzroka kvara i dijagnostiku potreba za održavanjem.

Spomenute vrednosti se primarno odnose na kompresore, ali potrebno je pratiti i drugu opremu i uređaje poput filtera, sušača itd. Posebno, krajnje korisnike treba pažljivo motriti kako bi se odmah otkrila ispuštanja.

## Primer: Detaljni energetski pregled sistema komprimovanog vazduha

Primer: Detaljni energetski pregled sistema komprimovanog vazduha demonstrira proces analize i merenja sproveden tokom energetskog pregleda fabrike sa 132 mašine koji koriste komprimovani vazduh.

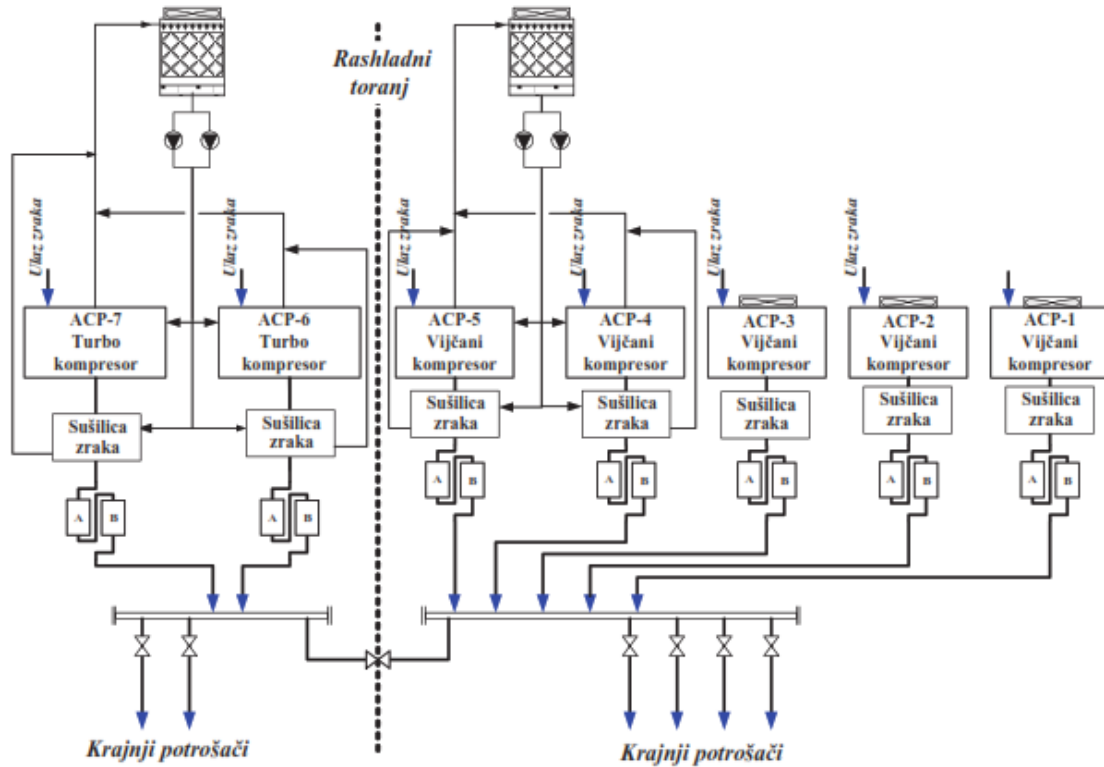
### (a) Osnovne činjenice o fabrici i sistemu komprimovanog vazduha

Ukupni troškovi za električnu energiju	2,18	mil. USD
Ukupna potrošena električna energija	39,91	GWh
Jedinična cijena električne energije	0,0546	USD/(kWh)
Cijena električne energije za komprimirani zrak	0,37	mil. USD
Ukupna električna energija (potrošena u sustavu komprimiranog zraka)	6,49	GWh
Ukupni udio za sustav komprimiranog zraka (KZ)	16,26	%
Prosječna snaga sustava KZ-a	773	kW
Instalirana snaga sustava KZ-a	1.092	kW
Faktor opterećenja sustava KZ-a	0,71	

### (b) Opis postrojenja

Dve su odvojene hale (u prvoj je 5 kompresora, a u drugoj 2). Svi su povezani sistemom cevi koji služi i kao rezervoar vazduha kako bi se smanjila frekvencija opterećenja i rasterećenja kompresora.

Opšta shema sistema komprimiranog vazduha prikazana je na Slici 10-12, a specifikacije sistema prikazane su u Tabeli 10-6 i Tabeli 10-7.



Kompresor	Tip	Kapacitet * m <sup>3</sup> /min	Snaga motora kW	Rashladni sustav	Sušilo zraka kW
ACP - 1 (u pričuvi)	Vijčani	17,8	132	Zrak	5,4
ACP - 2 (u pričuvi)	Vijčani	17,8	132	Zrak	5,4
ACP - 3	Vijčani	17,8	132	Zrak	5,4
ACP - 4	Vijčani	19,5	132	Voda	4,6
ACP - 5	Vijčani	19,5	132	Voda	6,6
ACP - 6	Turbo	21,6	150	Voda	6,6
ACP - 7	Turbo	21,6	150	Voda	6,6
<b>UKUPNO:</b>		<b>135,6</b>	<b>960</b>		<b>40,6</b>

	Protok vode l/min	Snaga kW	Tip
CT-5 (100 RT)	1.300	1,5 (ventilator)	Protutlačni
CT-7 (100 RT)	1.300	1,5 (ventilator)	Protutlačni
CDP-5-1	1.300	22	Centrifugalni
CDP-5-2 (u pričuvi)	1.300	22	Centrifugalni
CDP-8-1	1.300	22	Centrifugalni
CDP-8-2 (u pričuvi)	1.300	22	Centrifugalni
<b>UKUPNO:</b>		<b>91</b>	

(c) Opseg posla

Tri su aktivnosti koje treba sprovesti:

- inspekcija, testiranje i pronalaženje kvarova (pre gašenja tvornice)
- testiranje na propuštanja (pre gašenja i tokom njega)
- razvoj i preporuke za mere poboljšanja sistema komprimovanog vazduha.

## Pregled sistema, testiranje i pronalaženje kvarova

Kako bi se odredio puni opseg posla za planirano održavanje i plan zamene delova, sproveden je program inspekcije i testiranja pre gašenja fabrike. Inspekcija i testiranje odnose se na vizualni i auditorni pregled, uz dodatno testiranje komponenti poput pritisaka i temperature, testa za ispuštanja, provere broja obrtaja itd, kako bi se verifikovao pogonski postupak i identifikovali kvarovi gde i ako postoje.

U toj fazi posla planirane su sledeće provere:

- specifikacije glavnih krajnjih korisnika
- postavljenog pritisaka
- specifikiranog protoka
- specifikiranog kvaliteta vazduha.

Rezultati inspekcije su:

### 1. Kompresori i sušaći vazduha

- Servisiranje tih mašina uobičajeno svaki mesec sprovodi ovlašćena firma (podmazivanje, stanje rotora,
- prisutnost vibracija, previsok pritisak ispuštanja i temperatura, napetost remena i adekvatnost hlađenja).
- Dnevno beleženje relevantnih periodičkih merenja pravilno je sprovedeno.
- Instrumenti su u dobrom stanju, ali nije sprovedena njihova kalibracija u traženom razdoblju. Menadžment tehničkog dela mora to sprovesti u roku od 30 dana.
- Ulazna temperatura vazduha je u rasponu kako je preporučuje proizvođač.
- Otkrivena su ispuštanja u odvodu kondenzata i predložene su popravke.

### 2. Inspekcija distributivne mreže

- Dimenzionisanje cevi i odvoda je adekvatno. Tokom vremena opterećenja, pad pritisaka u najdužem cevovodu je manji od 0,5 bar ili 0,25 mbar/m. Taj rezultat zadovoljava standarde i preporuke proizvođača i projektanta.
- Kako bi se izbegao gubitak vazduha koji se često javlja kod ručno upravljanih ventila, preporučeni su automatski ventili za odvod. Nagib cevi nije dovoljan. Opšte, glavna cev treba biti postavljena sa padom ne manjim od 1 m na 100 m u prstenu cevi u smeru toka vazduha.
- Zbog energetske efikasnosti treba postaviti automatski odvajač na dno odvoda u sistemu komprimovanog vazduha. Pouzdani elektronički odvajači kondenzata osiguravaju da se nakupljena voda redovno uklanja. Tip odvajača sa plutajućom kuglicom je najčešći jer stvara pozitivno pražnjenje, otvarajući se samo ako ima vode i zatvarajući se čim voda iscuri.

- Ispusti su najveći gubitak energije povezan s korišćenjem komprimiranog vazduha. Česti su ispusti veći od 20% na lokacijama krajnjih potrošača. Izvori tih ispuštanja su brojni, a najčešći problemi se odnose na:
  - ventil za odvod kondenzata koji ostaje otvoren
  - ventile za isključivanje koji ostaju otvoreni
  - propuštajuće cevi i zglobove
  - propuštajuće gumene cevi i spojnice
  - propuštajuće regulatore pritisaka
  - linije vazdušnog hlađenja koje su stalno otvorene
  - opremu koja koristi vazduh koja ostaje u pogonu i kada nije potrebna.

Nakon sprovedene inspekcije pripremljen je akcioni plan. Neke od predloženih poteza ne zahtevaju daljnju analizu jer su očiti. Ali, sledeći potezi, pretpostavljajući i test na ispuštanja, prepoznati su kao vrlo obećavajući i sprovedeni su odmah, bez čekanja na gašenje fabrike.

#### A) Aktivnosti pre gašenja postrojenja

1. Svi natkriveni kanali su očišćeni. Bili su zaprljani otpadnim sirovinama i prašinom.

2. Spojnice i ventili provereni su sapunastom vodom. Broj mašina u proizvodnom pogonu, koji koriste komprimirani vazduh, je 132. Povezani su na glavni cevovod sa dva ventila i plastičnom cevi. Test sapunastom vodom je obavljen na 40 tačaka. Rezultati su prikazani u Tabeli 10-8. Ispuštanja su uočena na 33 tačke ili na 82,5% spojnica na glavne distributivne linije. Popravak svih spojnica se snažno preporučuje. Visok intenzitet ispuštanja je prikazan s +++, srednji s ++ i mali s +.

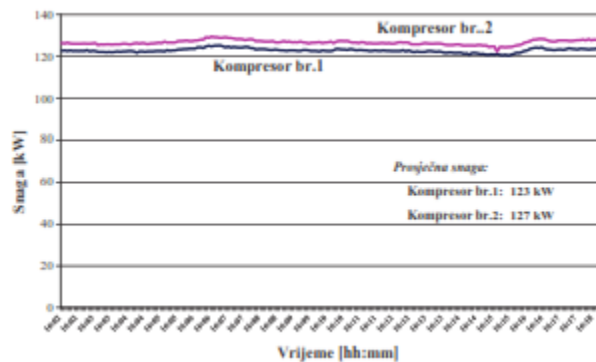
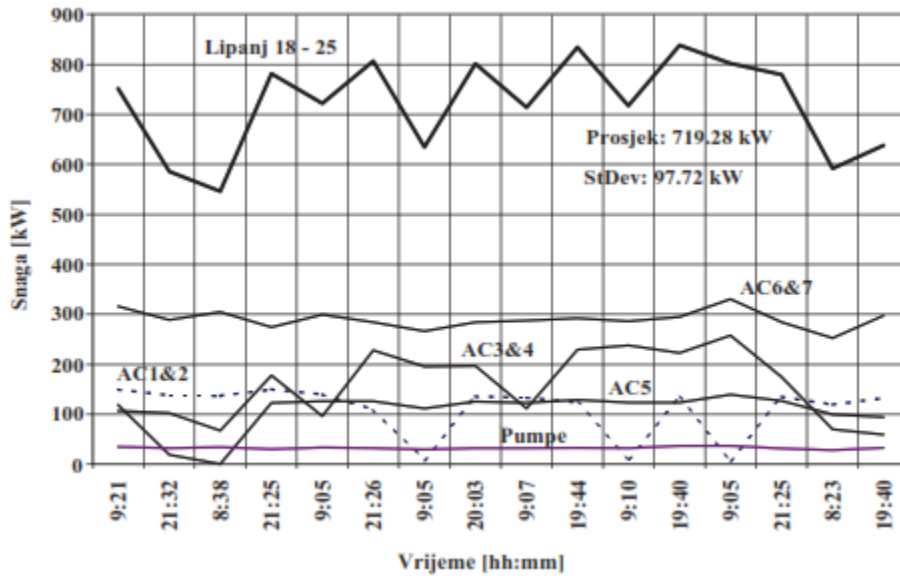
Br.	Broj stroja	Ispuštanje		Br.	Broj stroja	Ispuštanje	
		Da	Ne			Da	Ne
1	69-1	+++		21	67-2	+	
2	70-2		+	22	67-1	+++	
3	70-4	+		23	66-1	+	
4	70-6	+		24	66-2		+
5	71-7	++		25	66-4	++	
6	72-5		+	26	66-5	++	
7	71-4		+	27	66-6	+++	
8	72-2		+	28	66-8	++	
9	71-1		+	29	64-8	++	
10	73-2	++		30	64-7	+++	
11	74-3	+++		31	64-6	+++	
12	74-6	+++		32	64-5	+++	
13	76-7	+++		33	64-3	+++	
14	76-4		+	34	64-2	+++	
15	75-2	+		35	64-4	+++	
16	68-3	+++		36	65-1	++	
17	68-8	++		37	68-2	+++	
18	67-6	+++		38	69-5	++	
19	67-5	+		39	69-8	+++	
20	67-3	+++		40	73-6	++	
21	67-2	+		<b>UKUPNO:</b>		<b>33</b>	<b>7</b>

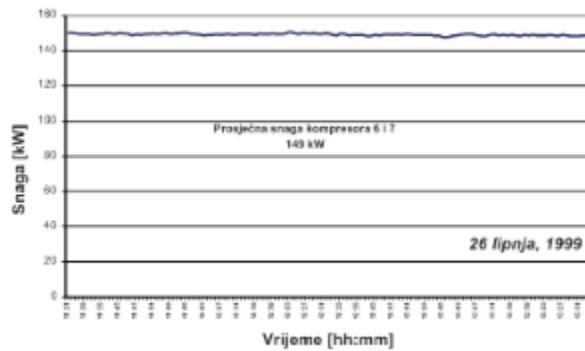
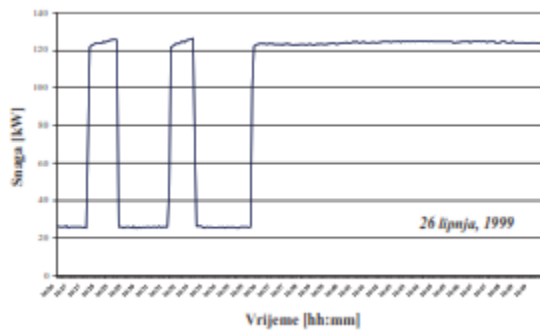
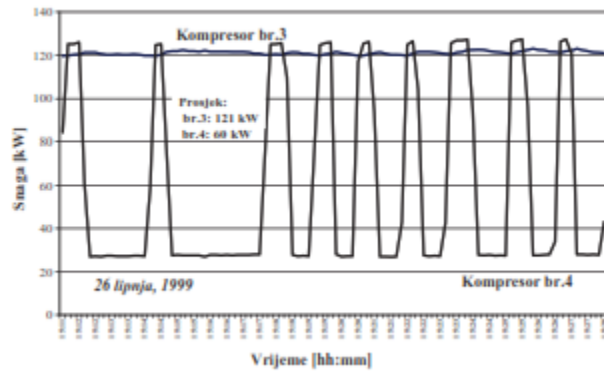
Odmah nakon završetka, sistem je popravljen.

B) Test ispuštanja vazduha (prije i tokom gašenja)

(a) Merenja, tehnički proračuni, analiza i pronalasci

Snaga svih kompresora, pumpi i ventilatora u vremenu proizvodnje prikazani su na Slici 10-13. Individualna potrošnja kompresora prikazana je na Slici 10-14, Slici 10-15, Slici 10-16 i Slici 10-17.





- Ukupna instalirana snaga na osovini električnih motora = 960 kW
- Ukupni godišnji broj pogonskih sati fabrike = 8.400 h
- Ukupna snaga koju uzimaju kompresori = 664,8 kW
- Maksimalna dobava svih kompresora = 135,6 m<sup>3</sup>/min
- Stvarna dobava (bez korekcija za temperaturu i pritisak):

$$Dobava = \frac{\text{stvarna električna snaga kompresora}}{\frac{\text{instalirana snaga na osovini motora}}{\text{efikasnost električnog motora}}} \cdot \text{instalirana dobava} = \frac{664,8}{\frac{960}{0,93}} \cdot 135,6 = 87,33 \text{ [m}^3/\text{h]}.$$



(b) Ukupno vreme u pogonu i vreme opterećenja u analiziranom razdoblju

Ukupno vreme u pogonu i vreme opterećenja u analiziranom razdoblju prikazano je u Tabli

Zračni kompresor	Ukupni sati u pogonu tijekom tjedna [h]	% od 168 sati (7 dana)	Vrijeme opterećenja [h]	% vremena opterećenja	% rasterećenja / pogona
No. 1 (VIJČANI) - Zrakom hlađen	1,33	0	1,32	0	0
No. 2 (VIJČANI) - Zrakom hlađen	139	82	138,15	82	0
No. 3 (VIJČANI) - Zrakom hlađen	111,67	66	105,51	62,8	5,5
No. 4 (VIJČANI) - Vodom hlađen	150,76	90	88,3	52,5	41,4
No. 5 (VIJČANI) - Vodom hlađen	150,27	90	145,49	86,6	3,2
No. 6 (TURBO) - Vodom hlađen	166	99	166	98,8	0
No. 7 (TURBO) - Vodom hlađen	167	99	166	98,8	0

U tom razdoblju je glavni kompresor bio br. 4 s 52,5% vremena u stanju opterećenja. Zbog održavanja je preporučljivo menjati glavni kompresor (jedan od vijčanih) svakog meseca.

### C) Prosečna snaga kompresora

$$\text{Prosječna snaga kompresora} = \frac{\text{energija koju su koristili kompresori u analiziranom razdoblju [kWh]}}{\text{ukupan broj sati pogona}}$$

Snaga rasterećenja kompresora je oko 22% nazivne snage.

Merene prosečne električne snage motora su:

- kompresor br. 1 = (van pogona)
- kompresor br. 2 = 138,91 kW
- kompresor br. 3 = 134,91 kW
- kompresor br. 4 = 134,91 kW
- kompresor br. 5 = 132,16 kW
- kompresor br. 6 = 146,16 kW
- kompresor br. 7 = 146,16 kW.

### D) Test ispuštanja vazduha u distributivnoj mreži (u razdoblju bez proizvodnje)

- Svi ventili neposredno pre mašina su zatvoreni.
- Pritisak u cevovodu je oko 0.
- Pokrenut je kompresor br. 3.
- Nakon postizanja postavljenog pritiska (7 bar g) prosečni protok komprimovanog vazduha je (Slika 10-15):

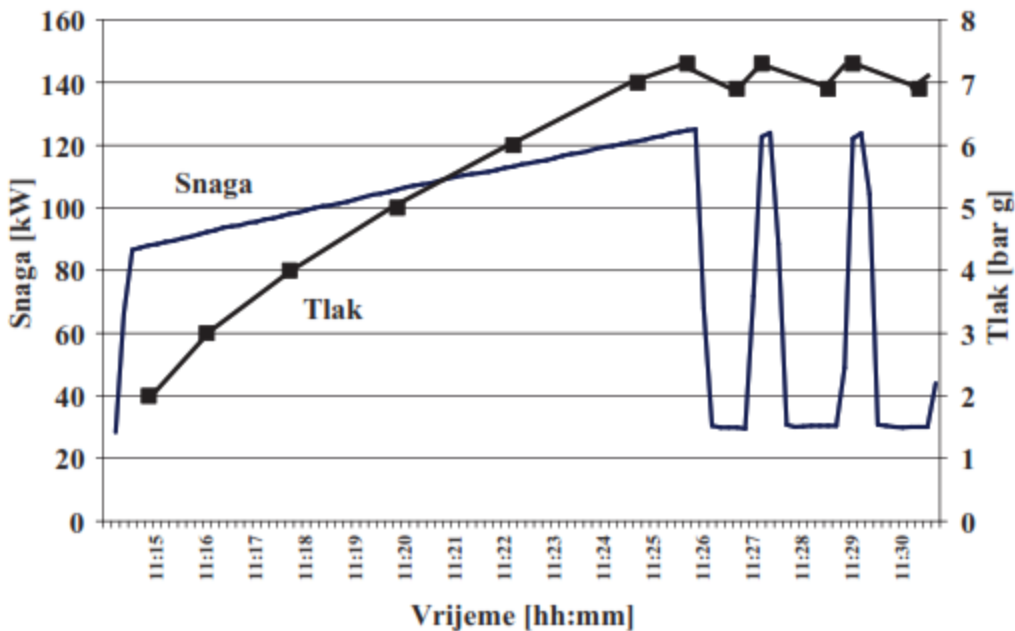
$$V_{\text{Leak1}} = V_{\text{NominalCOMP.3}} \cdot \frac{T_{\text{OPT}}}{T_{\text{OPT}} + t_{\text{RASTE}}} = 17,8 \cdot \frac{27 \text{ [s]}}{27 \text{ [s]} + 70 \text{ [s]}} = 4,95 \text{ [m}^3\text{/min]}.$$

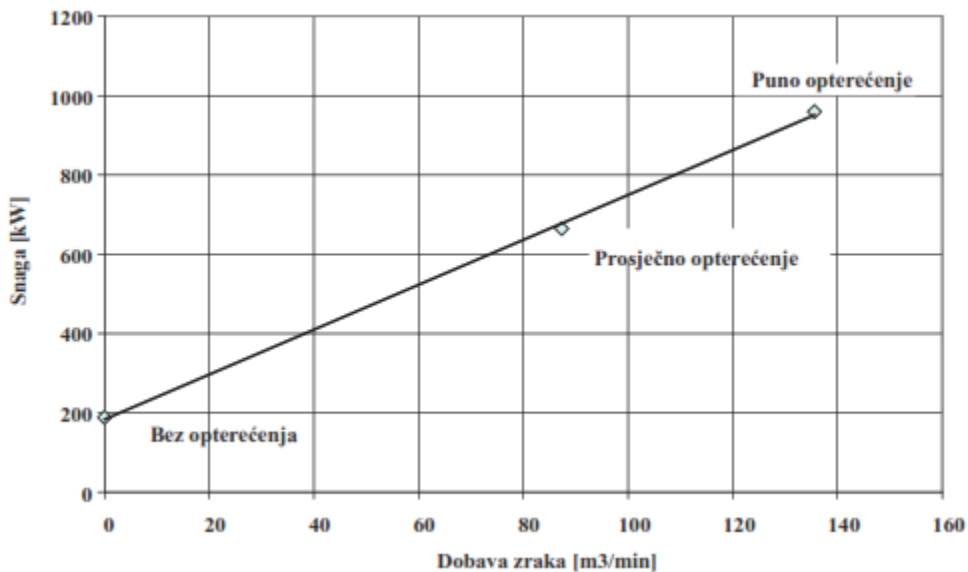
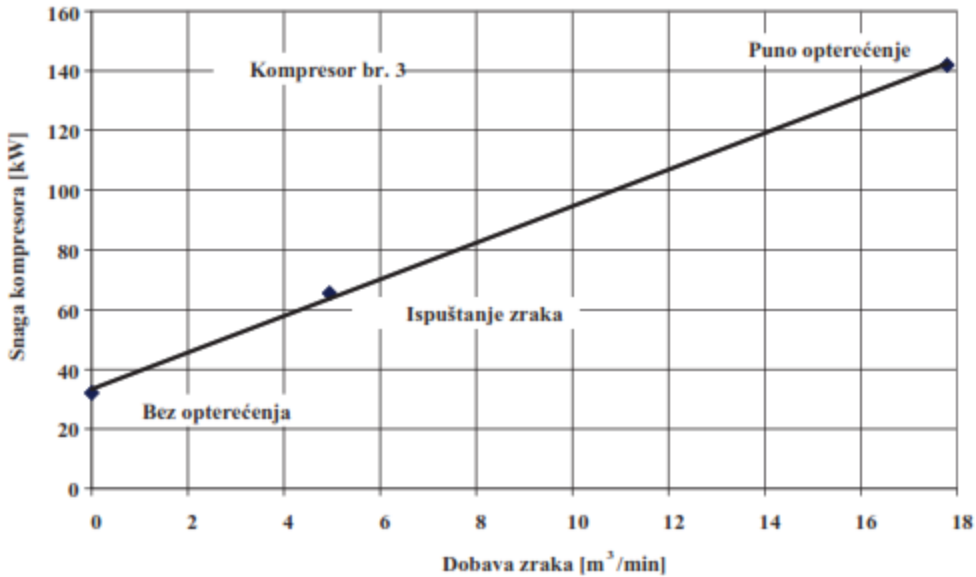
- Merenjem brzina dobave na ulazu u kompresor (zračni usis) prosečna brzina vazduha tokom vremena opterećenja ja 4,04 m/s. Kako je prečnik ulaznog žljeba 300 mm, to znači da je dobava vazduha 0,285 m<sup>3</sup>/s ili 17,13 m<sup>3</sup>/min. To ukazuje na to da kompresor radi vrlo blizu nazivnom kapacitetu.

Vazdušni gubitak je:

$$\text{Gubitak zraka} = \frac{\text{mjerena ispuštanja}}{\text{prosječni godišnji protok komprimiranog zraka}} = \frac{4,95}{87,33} = 0,057 = 5,7\%.$$

- Trošak za energiju za proizvodnju komprimiranog vazduha bio je 0,057 · 370.000 = 21.090 USD.
- Profil snage i pritiska tokom tog testa prikazan je na Slici 10-18. Puno opterećenje, ispuštanja vazduha i snaga kompresora br. 3 u rasterećenju u odnosu na dobavu prikazani su na Slici 10-19.





### E) Pad pritiska

Kritični krajnji korisnici definisani su kao oni koji su fizički najudaljeniji s obzirom na dužinu cevi. U tim se tačkama izvode merenja pritiska. Pad pritiska je (tokom vremena pogona fabrike) samo 0,05 bar, što znači da je distributivna mreža dobro projektovana (preporučeni pad pritiska do krajnjih korisnika je manji od 0,2 bar).

Nakon svakog sušača vazduha instalirana su dva filtera u serijskom spoju (Slika 10-1). Merenjem padova pritiska nasvakom od njih pronađeno je da su prosečni padovi pritiska:

- Filter A = 0,35 bar;
- Filter B = 0,25 bar;
- UKUPNO = 0,60 bar.

Taj pad pritiska smatra se prevelikim i stoga filtere treba proveriti.

#### F) Ventilacija kompresorske sobe

U slučaju prikazane fabrike, jedna strana kompresorske sobe je otvorena ka spoljašnjoj sredini, a temperatura u sobi je 30,6 °C.

Za tri vazduhom hlađena kompresora veza s okolinom je dobro projektovana.

#### G) Preporuke

##### (a) Postavljanje paralelnog seta filtera (A i B)

Postavljanjem novog paralelnog seta filtera, jedinstveni protok vazduha po setu filtera će biti smanjen za 50%, a odgovarajući pad pritiska za 75%. To znači da će pad pritiska biti samo 0,15 bar. Takođe, pad pritiska u kompresoru može se smanjiti za 0,45 bar. Potrošnja energije može se smanjiti:

$$\begin{aligned} \text{Uštede na energiji} &= \frac{\text{snižavanje tlaka istjecanja}}{\text{nazivni tlak istjecanja}} \cdot \text{godišnja potrošnja energije} = \\ &= \frac{0,45}{8} \cdot 6,49 = 0,36 \text{ [GWh]}. \end{aligned}$$

Trenutan set filtera je bio premali za potrebni protok.

##### (b) Snižavanje pritiska isticanja

Većina mašina treba niži pritisak od pritiska na kojem radi sistem komprimiranog vazduha. Analizom preporučenih pritiska za krajnje korisnike na ulazu u mašina, procenjeno je da 18% mašina treba pritisak od 7 bar g, a ostali mogu raditi na 5 bar g ili na nižem pritisku. Smanjenje potrošnje energije može biti:

$$\begin{aligned} \text{Uštede na energiji} &= \frac{\text{snižavanje tlaka istjecanja}}{\text{nazivni tlak istjecanja}} \cdot \text{postotak strojeva} \cdot \text{godišnja potrošnja energije} = \\ &= \frac{2}{8} \cdot 0,82 \cdot 6,49 = 1,33 \text{ [GWh]}. \end{aligned} \quad (1)$$

Fabrics je preporučeno odvajanje snabdevanja vazduha za mašine u dve grupe prema potrebnom pritisku: jedna grupa za mašine koji rade na pritisku 7 bar g i druga s 5 bar g.

##### (c) Uklanjanje ispuštanja u mašinama

Postotak gubitka vazduha u kompresorima već je proračunat a gubitak energije je:

$$\text{Gubitak energije} = \frac{4,95}{87,33} \cdot 6,49 = 0,37 \text{ [GWh]}$$

(d) Postavljanje solenoidnih ventila za svaku mašina u slučaju kada mašina nije u pogonu, a ručni ventil nije zatvoren (kvarovi, popravci itd)

Na osnovu iskustva, može se proceniti da 3% ukupnog godišnjeg pogonskog vremena mašine mogu biti

električki isključene, ali ne i odvojene od distributivne mreže komprimovanog vazduha. Ta vrednost je testirana u jednom delu pogona sa 33 mašina tokom jedne radne smene.

Ispuštanje se može proceniti kako sledi:

$$Gubici\ u\ mirovanju = 0,03 \cdot 82,38 = 2,47\ [m^3/min].$$

Gubitak energije je:

$$Gubitak\ energije = \frac{2,47}{87,33} \cdot 6,49 = 0,18\ [GWh].$$

H) Očekivane uštede na energiji

	Jedinica	A	B	C	D	UKUPNO
Smanjenje energije	GWh	0,36	1,33	0,37	0,18	2,24
Snižavanje energetske troškova	USD godišnje	19.656	72.618	20.202	9.828	122.304

Ukupno godišnje smanjenje troškova je 122.304 USD ili 5,6% ukupnih troškova fabrike za električnu energiju.

## 10.6. Primer: Poređenje opterećenja i rasterećenja i testova pumpanjem

Stvaran primer ilustruje poređenje dva tipa testova: (a) opterećenje i rasterećenja i (b) pumpanja. Sprovedeni su u istoj fabrici, na isti dan i u istim uslovima. U prikazanom primeru fabrika ima 19 mašina koji koriste komprimovani vazduh. Ukupni instalisani kapacitet je 151,1 normiranih m<sup>3</sup>/min, a ukupna električna snaga motora 931 kW. Postavljeni pritisak vazduha u sistemu komprimovanog vazduha je 6 barg.

### 10.6.1. Test opterećenja i rasterećenja

Dobava vazduha kompresora korištenih za testiranje je 12,4 normiranih m<sup>3</sup>/min, uz ulaznu snagu od 75 kW. Regulacija je uključivanjem i isključivanjem (on/off).

Ciklus:	Vrijeme: u pogonu, opterećenje $T_{OPT}$ [min]	Vrijeme: u pogonu, rasterećenje $T_{RASTE}$ [min]
1	3,6	2,0
2	3,2	2,5
3	3,5	2,05
4	3,1	2,1
UKUPNO:	13,4	8,65

$$Ispu\u0161tanje = Q \cdot \frac{T_{OPT}}{T_{OPT} + t_{RASTE}} = 12,4 \cdot \frac{13,4}{13,4 + 8,65} = 7,54 \text{ [normnih m}^3/\text{min]}$$

$$E = H \cdot \frac{T_{OPT}}{T_{OPT} + t_{RASTE}} \cdot P_C = 8.400 \cdot \frac{13,4}{13,4 + 8,65} \cdot 75 = 382.857 \text{ [kWh]}$$

Ako je cena elektri\u0107ne energije 0,0435 USD/(kWh), izgubljeni iznos godi\u0161nje je 31.190 USD svake godine.

Test pumpanjem

$$Ispu\u0161tanje = \frac{V}{\tau} \cdot \frac{p_1 - p_2}{B} = \frac{17,74}{4,6} \cdot \frac{6,1 - 4,6}{1,013} = 5,71 \text{ [m}^3/\text{min]}$$

Oba testa su sprovedena na isti dan i pod istim uslovima na istom sistemu komprimovanog vazduha. Me\u010dutim, dobivena su dva razli\u010dita rezultata:

(1) u slu\u010daju testa optere\u0107enja i rastere\u0107enja, prora\u010dun ispu\u0161tanja baziran je na sprovedenim merenjima je 7,54 m<sup>3</sup>/h, a u

(2) slu\u010daju testa pumpanjem, on je 5,71 m<sup>3</sup>/h.

Razlika je znatna (24% u odnosu na ve\u0107u vrednost).

Razlog je u tome \u0161to gre\u0161ke merenja nekih od uticajnih faktora nisu uzete u obzir.

Na primer, ambijentalna temperatura, zapremina vazduha u sistemu i u prijemnicima su procenjeni grubo, na osnovu nacрта, postoje\u0107ih industrijskih mernih instrumenata itd. Ali, oba rezultata su vrlo korisna jer ukazuju na to da postoje znatni ispusti koje treba ukloniti kako bi se snizili tro\u0161kovi za energiju za komprimovani vazduh.

Nema sumnje da se mogu sprovesti ta\u010dnija merenja, ali pitanje je jesu li potrebna.

Dobijanje ta\u010dnijih podataka mo\u017ee biti mnogo skuplje. Upravljanje energijom zapo\u010dinja se ljudima i da uvo\u0111enje bilo kakvog testa u pravilnim razmacima mo\u017ee motivisati ljude na promenu svog stava prema energiji i zapo\u010dnu kontinualnu praksu pobolj\u0161anja radnih parametara.