

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikan koulutusohjelma

Vesa Skarp

KAASUTURBIININ KORJAUSKERTOIMIEN MÄÄRITTÄMINEN

Opinnäytetyö 2011

## TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka

Skarp, Vesa

Kaasuturbiinin korjauskertoimien  
määrittäminen

Opinnäytetyö

25 sivua + 17 liitesivua

Työn ohjaaja

lehtori Risto Korhonen

Toimeksiantaja

Profimill Oy

Toukokuu 2011

Avainsanat

kaasuturbiini, korjauskerroin,  
korjauskäyrä

Opinnäytetyön tarkoitus oli kerätä ja muodostaa käyttökelpoista dataa turbiinien korjauskertoimista Profimill Oy:lle. Yritys puolestaan pyrkii korjauskertoimia hyväksikäyttäen kehittämään laskentaohjelman, jolla pystyttäisiin nykyistä paremmin toteamaan turbiinin mahdollinen huollon tarve. Ohjelman antaman odotetun tehon tulisi vastata todellista tehoa, näin ei kuitenkaan juuri ikinä ole.

Työssä tarkastellaan mahdollisimman monen ja erilaisen kaasuturbiinin korjauskäyriä. Näiden käyrien avulla oli tarkoitus pyrkiä määrittämään kullekin turbiinityypille laskentaohjelman tarvitsemat korjauskertoimet. Tarpeelliset korjauskertoimet puolestaan määriteltiin kaasuturbiinin standardin mukaan, jolloin tarkasteltavien korjauskäyrien määrä saatiin rajattua kuuteen.

Tehtävä oli muodostaa saatavilla olevasta materiaalista sellaista dataa, että se soveltuu laskentaohjelman käyttötarkoitukseen ja että datasta pystytään muodostamaan mahdollisimman tarkka kaava korjauskäyrälle.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Technology

Vesa Skarp

Determining the Correction Factors for a  
Gas Turbine

Bachelor's Thesis

25 pages + 17 pages of appendices

Supervisor

Risto Korhonen, Senior Lecturer

Commissioned by

Profimill Oy

May 2010

Key words

gas turbine, correction factor, correction  
curve

The objective of this study was to collect and create useful data about the correction factors of gas turbines for Profimill Ltd. The corporation would then use the correction factors to develop a calculation program which could better predict the maintenance needs of the gas turbine. The power in real conditions should be the same as the calculated power, but most often this is not the case.

The correction curves of a large number of gas turbines were scrutinized in the study. The curves helped to determine the correction factors which were needed in the calculation program for each gas turbine. The necessary correction curves were determined according to the gas turbine standard, which gave six important curves to be used in this study.

The objective was to modify data about the correction factors so it could be used for part of the calculation program and also to help create as precise a formula for the correction curves as possible.

## ALKUSANAT

Työ tehtiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun opinnäytetyönä Profimill Oy:n toimeksiannosta. Työ liittyy Profimill Oy:n ja Eagle Filters Oy:n yhdessä kehittämään kaasuturbiinilaitoksen tehokkuuden ja hyötysuhteen mittaussjärjestelmään. Työn tavoitteena on pohjustaa ja auttaa kehittämään kaasuturbiinilaitoksen hyötysuhteen laskentamalli. Ohjelmiston yhtenä tavoitteena on myös ympäristökuorman raportointi osana laskentamallia.

Kiitän Profimill Oy:n Mikko Majaa saamastani mahdollisuudesta tehdä yritykselle kyseinen päättötyö. Monista ongelmista huolimatta luulen saaneemme aikaiseksi suhteellisen hyvän ja todenmukaisen ohjelman kuvaamaan kaasuturbiinin toimintaa eri tilanteissa.

Haluan myös kiittää Eagle Filtersin Juha Kariluotoa, joka on koko projektin tilaaja. Kiitän häntä monista ohjeista ja avusta, joita olen saanut opinnäytetyöni tekemiseen.

Viimeiseksi, mutta ei vähimmäksi, Kiitän ohjaajaani lehtori Risto Korhosta, joka ohjasi ja opasti minua monissa vaikeissa kysymyksissä opinnäytetyöni aikana.

Haluan myös mainita kiitokseni kaikille niille yrityksille, jotka luovuttivat elintärkeitä tietoja korjauskäyristä käyttöömme. Ilman näitä käyriä opinnäytetyön toteuttaminen olisi ollut lähestulkoon mahdotonta.

20.5.2011

Vesa Skarp

## RAPORTISSA KÄYTETTYJEN TERMIEN SELITYKSET

|                       |   |
|-----------------------|---|
| SI-järjestelmä        | Kansainvälinen yksikköjärjestelmä. SI-järjestelmä on maailman yleisin mittayksikköjärjestelmä. SI-järjestelmä sai nykyisen nimensä 1960, mutta keskeisimmiltä osiltaan se perustuu Ranskassa jo 1700-luvun lopulla käyttöön otettuun metrijärjestelmään. (1.) |
| HRSG kattila          | Heat Recovery Steam Generator eli lämmöntalteenottokattila. Kaasuturbiinin savukaasujen lämpö otetaan talteen kattilassa ja käytetään höyryturbiinissa sähkön valmistukseen. Kombivoimalaitos. (2.)   |
| Painetaso             | Painetasolla tarkoitetaan monessako eri vaiheessa lämmöntalteenottokattilassa suoritetaan lämmöntalteenottoa. (2.)  |
| Jälkipoltto           | Syötetään maakaasua turbiinin jälkeisiin savukaasuihin ja poltetaan savukaasun happea pois ja nostetaan savukaasun lämpötilaa ennen lämmöntalteenottokattilaa. Tämä lisää kattilan höyrytehoa.(2.)  |
| Raitisilmapoltto      | Puhallin puhaltaa ulkoilmaa kattilaan ja jälkipoltin lämmittää savukaasut 500°C:een. Raitisilmapolttoa käytetään sen varmistamiseksi, että prosessiin saadaan höyryä vaikka kaasuturbiini olisi epäkunnossa. (2.)   |
| Paineistettu poltto   | Tapa käyttää kiinteitä polttoaineita kombiprosessin polttoaineena. Kiinteä polttoaine poltetaan kaasuturbiinin polttokammion paikalla olevassa paineistetussa kattilassa. (2.)  |
| Paineistettu kaasutus | Kiinteä polttoaine kaasutetaan paineistetussa kaasuttimessa ja syntyvä kaasu johdetaan kaasuturbiinin polttoaineeksi. (2.)  |

IGV

IGV on kaasuturbiinin kompressorin edessä tai kompressorissa oleva siipivyöhyke tai vyöhykkeitä, joita voidaan säätää turbiinin tehon rajoittamiseksi. (2.)

|  |    |
|--|----|
| SISÄLLYS   |    |
| TIIVISTELMÄ  | 2  |
| ABSTRACT   | 3  |
| ALKUSANAT  | 4  |
| RAPORTISSA KÄYTETYT TERMIEN SELITYKSET                                   | 5  |
| 1. JOHDANTO  | 8  |
| 1.1. Toimeksiantajat   | 8  |
| 1.1.1 Eagle Filters  | 8  |
| 1.1.2 Profimill Oy   | 8  |
| 1.2. Tehtävä   | 9  |
| 1.3. Tavoitteet  | 9  |
| 2. PROJEKTIN KESKEISET TUNNUSLUVUT                                       | 10 |
| 3. VOIMALAITOSTYYPIT   | 10 |
| 3.1 Kaasuturbiinilaitos  | 11 |
| 3.2 Kombivoimalaitos   | 12 |
| 3.2.1 Yleistä  | 12 |
| 3.2.2 Rakenne  | 12 |
| 4. KAASUTURBIININ ISO/DIS 2314-STANDARDI OPINNÄYTETYÖN OSANA             | 13 |
| 4.1 Sovelluskohteet  | 14 |
| 4.2 Taseraja   | 14 |
| 4.3 Tulosten korjaus   | 15 |
| 4.3.1 Metodit  | 15 |
| 4.3.2 Korjauskertoimet   | 16 |
| 5. OPINNÄYTETYÖN KESKEISET MITATTAVAT SUUREET                            | 18 |
| 6. LASKENTAOHJELMAN TIEDOT   | 19 |
| 6.1 Käytetyt korjauskertoimet  | 19 |
| 6.2 Laskentaohjelman yksiköt   | 20 |
| 6.3 Kaavat ja yksikön muunnokset   | 21 |
| 7. KORJAUSKÄYRÄT   | 22 |
| 8. KEHITTÄMISKOHTEET   | 23 |
| 9. YHTEENVETO  | 24 |
| LÄHTEET  | 25 |
| LIITE 1 KORJAUSKÄYRÄT SIEMENS AG   |    |
| LIITE 2 KORJAUSKÄYRÄT GE MS6001, MS7001, MS9001 (Kotkan tehtaat)         |    |
| LIITE 3 KÄSIN LASKETUT KORJAUSKÄYRIEN KAAVAT SIEMENS 94.3A-2-TURBIINILLE |    |
| LIITE 4 KORJAUSKÄYRÄT SIEMENS V94.3A-2                                   |    |

## 1 JOHDANTO

### 1.1 Toimeksiantajat

#### 1.1.1 Eagle Filters

Varsinaisen kokonaisprojektin takana oleva yritys on Kotkassa toimiva Eagle filters. Eagle filters on suodattimiin ja suodatusmekanismeihin erikoistunut yritys. Eräs yrityksen toimialoista on juuri kaasuturbiinit ja niiden ilmansuodattimet. (3.)

Eagle filters valmistaa korkealuokkaisia uuden sukupolven suodattimia niin teollisuuteen, kuin muuhunkin yleiseen ilmanvaihtoon. Erilaisina osa-alueina mainittakoon mittatilaustyönä tehtävät suodattimet mille tahansa turbiinille, yleisilmanvaihdon suodattimet ja pölynpoistosuodattimet. (3.)

Tuotteiden etuna pidetään niiden erinomaista suodatustehokkuutta, hyvää mekaanista kestävyyttä sekä huippuluokan aerodynaamisia ominaisuuksia. Nämä asiat puolestaan muodostavat käyttäjän kannalta kustannustehokkaan paketin, jonka valmistaminen suoritetaan ammattitaidolla, jatkuvalla tuotekehityksellä, parhaista materiaaleista ja yli 10 vuoden kokemuksella. (3.)

#### 1.1.2 Profimill Oy

Profimill Oy on opinnäytetyön toimeksiantaja. Yrityksen tarkoituksena on kehittää yhdessä Eagle filtersin kanssa kaasuturbiinilaitoksille tehokkuuden ja hyötysuhteen mittausjärjestelmälle mahdollisimman tarkka laskentamalli.

Profimill Engineering Oy on teollisuuden parissa toimiva tietotekniikan palveluyritys. Toimialana yrityksellä on tuotannon tietojärjestelmäkokonaisuudet ja logistiset prosessit ja niiden tehostaminen. (4.) Erityisosaamisena on tuotannon- ja valmistuksen ohjaus, tiedonkeruu- ja



Erityisosaamisena ovat tuotannon- ja valmistuksen ohjaus, tiedonkeruu- ja raportointijärjestelmät, energianmittausjärjestelmät, tietojärjestelmien integrointipalvelut ja asiakaskohtaisten ohjelmistojen valmistaminen. (4.)

## 1.2 Tehtävä

Opinnäytetyön tehtävänä oli muodostaa kaasuturbiinien korjauskäyriä hyväksikäyttäen korjauskertoimet kullekin turbiinityypille erikseen. Näiden korjauskertoimien avulla laskentamalli pyritään saamaan lähelle todellista ympärillä vallitsevaa tilannetta. Lisäksi pyrittiin tarkastelemaan, ovatko erityyppisten ja eri valmistajien turbiinien korjauskäyrät hyvinkin erilaisia vai voisiko jonkin valmistajien turbiineille olla voimassa yhteinen kaava. Yhtenä pohdittavana asiana olivat myös tapaukset, jolloin korjauskertoimen oletetaan olevan yksi eli suurella ei olisi merkitystä tehoon ja hyötysuhteeseen. Muodostuneita kaavoja pitäisi pystyä käyttämään sellaisenaan osana turbiinin tehokkuuden ja hyötysuhteen laskentamallia.

Tarkasteluryhmän laajuudeksi valittiin kolme erityyppistä turbiinia ja niiden korjauskäyrät. Työssä käytetyt kaasuturbiinimallit ovat seuraavat: Siemens 94.3A-2, Siemens AG ja GE MS6001; MS7001; MS9001.

## 1.3 Tavoitteet

Konkreettisenä tavoitteena opinnäytetyölle on dokumentti, jolla ohjeistetaan kutakin voimalaitosta etsimään omasta laitoksestaan laskentamallin toteutumiseksi vaadittavat tiedot ja käsittelemään niitä.

Tarkoituksena oli siis muokata valmistajilta ja tehtailta saatuja korjauskäyriä siihen muotoon, että niistä saadaan laskentaohjelmaa varten korjauskertoimet kulloinkin vallitsevalle prosessin tilalle. Käytännössä turbiinin korjauskäyrät piti muokata maasta ja yksiköistä huolimatta niin, että kaava noudattaisi laskentaohjelman yksiköitä.

## 2. PROJEKTIN KESKEISET TUNNUSLUVUT

Kokonaisprojektin kannalta opinnäytetyö on vain yksi monista osa-alueista. Alussa sivusin hiukan kokonaisprojektin tavoitetta, mutta opinnäytetyön kannalta tätä projektia kannattaa miettiä myös hieman tarkemmin.

Maailmalla on noin 20000 kaasuturbiinilaitosta, joista suurin osa ei toimi optimaalisella tavalla hyötysuhteen, polttoainetalouden ja päästöjen osalta. Nykyiset seurantamenetelmät ovat puutteellisia, eikä päättäjillä ole oikeaa ja uskottavaa tietoa laitoksen toiminnasta. Puutteellinen informaatio puolestaan johtaa taloudellisiin menetyksiin. (5.)

Hankkeen tavoitteena on muodostaa laitoksen johdolle suunnattu ohjelmisto, jolla raportoidaan laitoksen tehosta, hyötysuhteesta ja ympäristökuormasta. Ohjelmiston tarkoituksena on seurata ja raportoida tunnuslukuja, jotka on korjattu vastaamaan suunnittelupistettä. Näitä tunnuslukuja ovat: teho, polttoaineenkulutus ja CO<sub>2</sub>-päästöt.(5.)

Ohjelmiston keskeisiä osa-alueita ovat: tunnuslukujen analysointi; visualisointi ja raportointi, laskentamoottori ISO-pisteisten tunnuslukujen muodostamista varten, tietokanta prosessitietojen tallentamista varten ja liityntäohjelmisto laitoksen olemassa olevaan automaatiojärjestelmään.(5.)

Laskentamalli osoittaa selvästi milloin turbiini tai suodattimet alkavat likaantua. Näiden asioiden huomaaminen ei ole kuitenkaan laskentaohjelman tärkein tavoite. Tärkeimpänä tavoitteena voidaan pitää ohjelman kykyä parantaa tietoa prosessin tilasta, jolloin myös turbiinin kannattavuutta voidaan lisätä. Tätä kautta esiin tulevat myös mahdolliset kustannussäästöt.

## 3.VOIMALAITOSTYYPIT

Ennen varsinaiseen opinnäytetyöhön paneutumista tarkastellaan vähän lähemmin kaasuturbiinilaitoksen ja kombivoimalaitoksen rakenteita. Näiden kahden erityyppisen ratkaisun ymmärtäminen ja erottaminen on välttämätöntä

ja suotavaa päättötyön ymmärtämisen kannalta. Ymmärtämällä näiden rakenteiden eron vältetään turhalta taserajojen yli hyppimiseltä. Työ tehtiin kaasuturbiinin standardilla ja siinä olevilla lainalaisuuksilla. Mikäli työ olisi laajennettu koskemaan myös kombilaitoksia, mukaan olisi täytynyt ottaa myös kombivoimalaitosten standardi.

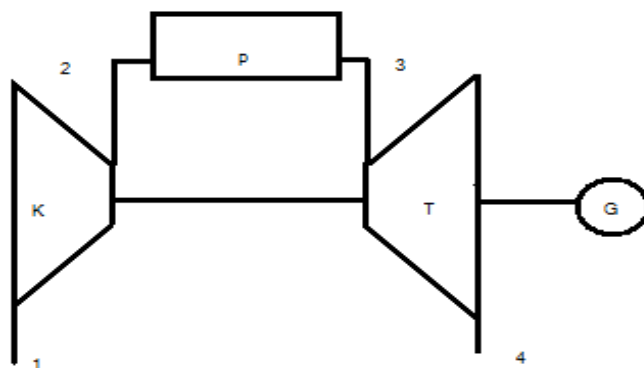
### 3.1 Kaasuturbiinilaitos

Kaasuturbiini koostuu neljästä pääosasta, samalle akselille kytketystä kompressorista ja turbiinista sekä polttokammioista ja vaihdelaatikon välityksellä turbiiniin yhdistetystä generaattorista.

Kompressorin tehtävänä on toimia turbiinin ahtimena, eli se kasvattaa paineen ennen polttokammiota. Tyypillinen puristussuhde kompressorille on 1:15.

Polttokammiossa ilmaa lämmitetään maakaasupolttimilla, jolloin ahdetun ilman lämpötila kohoaa 1200-1300 °C. Yli-ilman käyttö polttokammiossa on välttämätöntä muuten turbiinisiivet eivät kestäisi korkeaa lämpötilaa, vaan kärsisivät vaurioita. Kaasun tilavuusvirta kasvaa polttokammiossa suuresti lämmön ja paineen ansiosta, tämä saa aikaan turbiinin pyörimisen.

Pyörimisenergia muutetaan generaattorin avulla sähköksi, jonka taajuus on Suomessa 50 Hz.



K=kompressor T=Turbiini P=polttokammio G=generaattori

Kuva 1. Kaasuturbiinin periaatekuva

Perinteinen kaasuturbiinilaitos on siis tarkoitettu pelkästään sähköenergian tuotantoon ja jäljelle jäävä lämpöenergia johdetaan jäähdytystornien kautta hukkaenergiaksi taivaalle (prosessipiste 4) tai muutetaan lämmönvaihtimissa kaukolämmöksi.

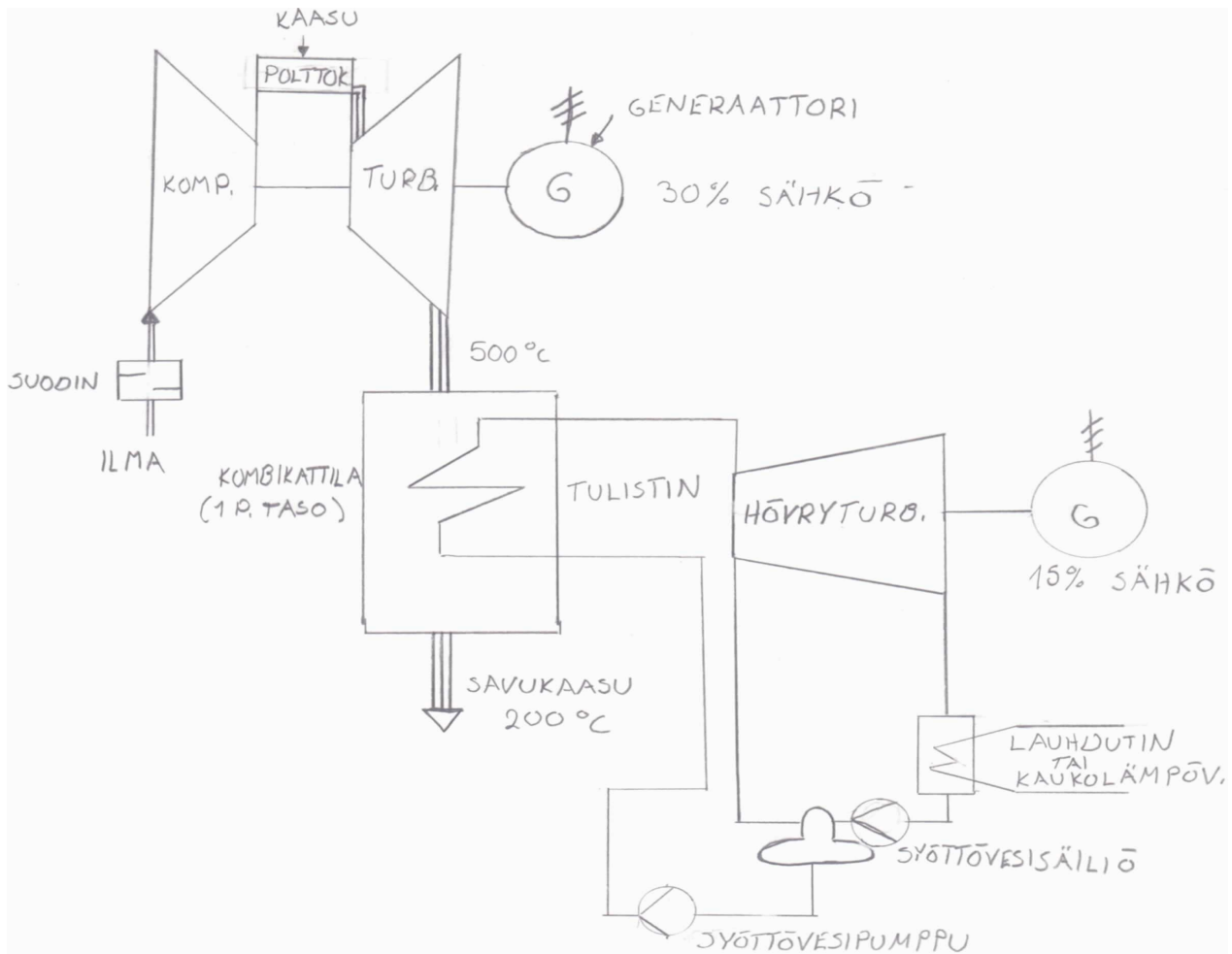
## 3.2 Kombivoimalaitos

### 3.2.1 Yleistä

Sähkön tuotanto pelkällä kaasuturbiinilla on usein kannattamatonta, vaikka nykyään yli 100 MW:n turbiineilla päästäänkin lähes 38 %:n hyötysuhteeseen. Tämä johtuu maakaasun korkeasta hinnasta verrattuna esimerkiksi kivihiiileen. Nykypäivänä lähes kaikki maakaasulla toimivat voimalaitokset rakennetaan siten, että kaasuturbiinin savukaasuilla lämmönvaihtimien välityksellä tehdään höyryä höyryturbiinia varten. Parhaimmillaan tällaisista kombivoimalaitoksista (lauhdevoimala) saadaan sähköntuotannon hyötysuhteeksi 60 %. Kombivoimalaitos voi tietysti tuottaa sähköenergian ohella myös lämpöä ja/tai prosessihöyryä, jolloin laitos on vastapainelaitos eikä lauhdevoimala. (6, 185.)

### 3.2.2 Rakenne

Rakenne eroaa pelkästä kaasuturbiinista siinä suhteessa, että turbiinin jälkeen on prosessiin lisätty vielä HRSG-kattila, joka tuottaa höyryn höyryturbiinille. Näin ollen saadaan myös kaasuturbiinin savukaasut tehokkaampaan käyttöön, jolloin hyötysuhde paranee huomattavasti. Vielä tehokkaampi prosessi saadaan, kun höyryturbiinin jälkeinen lämpö käytetään vielä esimerkiksi prosessihöyryksi ja/tai kaukolämmöksi. Tällöin puhutaan vastapainelaitoksista. Lauhdevoimalaitoksesta puhuttaessa jäännöslämpö ajetaan mereen. (6, 185.)



Kuva 2. Yhdellä painetasolla toteutetun kombivoimalaitoksen periaatekuva

Kombivoimalaitoksessa on kuitenkin myös mahdollista toteuttaa useampaa erilaista rakennemallia. Tämä puolestaan tekee kombiprosessista hankalan laskea, kun kaikille kattiloille ei ole voimassa samoja lainalaisuuksia. Tällaisia rakenteita ovat muun muassa kahdella painetasolla toteutettu kombivoimalaitos, jälkipoltto, raitisilmapoltto, paineistettupoltto ja paineistettukaasutus. (2.)

#### 4. KAASUTURBIININ ISO/DIS 2314-STANDARDI OPINNÄYTETYÖN OSANA

Standardi itsessään sisältää paljon tietoa kaasuturbiinin oikeaoppisesta testaamisesta. Siihen kuuluvista lainalaisuuksista, mittausmenetelmistä, mittauslaitteista, mittaus- ja laskentatarkkuuksista, mittauskohteista, kalibroinnista sekä tulosten laskennasta. Opinnäytetyön tehtävänä ei ollut kuitenkaan suorittaa mittauksia, vaan mittaukset olivat valmiina tehtaiden puolesta. Tehtävänä oli rajata mitattavia asioita vain välttämättömiin standardia apuna käyttäen, sekä selvittää valmiina olevista korjauskäyristä korjauskertoimet.

#### 4.1 Sovelluskohteet

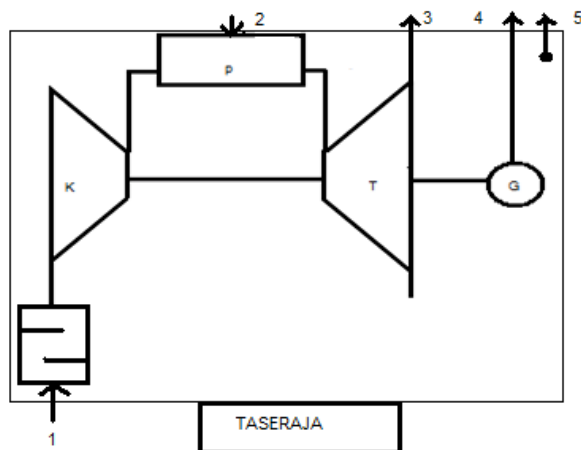
Kyseinen standardi on suunniteltu kaasuturbiineille, joissa on maakaasulla tai nestemäisellä polttoaineella toimiva polttojärjestelmä. Standardia sovelletaan myös kaasuturbiineihin kombivoimalaitoksilla ja muissa lämmön talteenottosysteemeissä.(7.)

#### 4.2 Testirajat

Testi raja eli taseraja kuvaa energian siirtymistä prosessin sisällä ja taserajan yli. Pääideana kaasuturbiini prosessissa on, että taserajan sisäpuolelle menevä energia ei häviä minnekään vaan muuttuu vain muotoaan. (7.)

Testirajan yli liikkuvat energiavirrat koostuvat seuraavista asioista. Taserajan yli turbiiniin johdetaan kompressorin läpi ilmaa ja polttokammioon johdetaan polttoainetta. Näiden kahden aineen yhtyessä puolestaan syntyy pakokaasuja, sähköä ja häviöitä, jotka poistuvat taserajan sisältä. Tyypillisiä häviöitä ovat säteilyhäviöt, laakeri- ja vaihdelaatikkohäviöt, generaattorihäviöt ja lämpöhäviöt.(7.)

Häviöiden huomioiminen on erittäin tärkeää prosessin kannalta, mutta opinnäytetyössä ne eivät näytelleet merkittävää osaa, koska niitä ei huomioitu laskentaohjelmassa.



1 Ilma, 2 polttoaine, 3 pakokaasut, 4 sähkö, 5 häviöt

Kuva 3. Taseraja

## 4.3 Tulosten korjaus

### 4.3.1 Metodit

Onnistuneen testin edellytys on suorittaa testi lähellä määrättyjä testiolosuhteita. Tällöin voidaan minimoida korjauksen tarve. On kuitenkin olemassa tilanteita, jolloin tämä ei ole mahdollista. Testi voidaan joutua suorittamaan jossakin muissa olosuhteissa, jolloin tulosta korjataan. Vertailu mitatun ja käytössä olevan tiedon välillä tehdään niin, että vertailuolosuhteet muutetaan korjauskertoimien avulla vastaamaan määrättyjä testiolosuhteita.(7.)

Keskeisiä suorituskyvyn yhtälöitä voidaan soveltaa kaikkiin standardissa mainittaviin kaasuturbiinien tyyppeihin. Käytännöllisesti katsoen tämä tarkoittaa korjausten laskemista testiarvoilla suositeltavissa olosuhteissa. Testissä tulee käyttää sopivia korjausyhtälöitä riippuen kyseessä olevan kaasuturbiinin mallista ja testin tavoitteesta. Keskeisten yhtälöiden muotoilu sallii tarkoituksenmukaisten korjausvaikutusten irrottamisen. Tällaisia

muunneltavia suureita ovat muun muassa ympäristön olosuhteet ja ruiskutusnesteet. Mitattu suoritusteho voidaan muuttaa vastamaan viitteellisiä olosuhteita korjauskertoimen avulla. Tyypillisiä korjauskertoimien suureita ovat suhteellinen mittausparametri teholle eli heat rate, pakokaasun virtaus, energia ja pakokaasun lämpötila.(7.)

Erä korjausarvoja on laskettu vain vaihtamalla yhtä muuttujaa kerrallaan. Korjaus lasketaan jokaisella arvolla, joka vaihtelee tietyllä välillä. Kuvaajana tämä tarkoittaa yhtä käyrää eli korjauskäyrää, jonka mukaan arvot vaihtelevat. Mikäli yhdellä algebran yhtälöllä voidaan laskea kaikki käyrän pisteet, on käyrälle olemassa vain yksi muuttuja.(7.)

Useamman korjauksen yhtälöllä on kaksi muuttujaa. Tällainen yhtälö vaatii kahden muuttujan muotoilemista. Kahden muuttujan luominen vaatii useita eriä korjausarvoja, ja edellä mainituista arvoista vain yksi saa vaihdella kerrallaan. Toinen muuttuja vaihdetaan erien välissä. Kahden muuttujan piirtäminen samaan kuvaajaan synnyttää käyrään useamman korjauksen ja korjauskäyrän, joista toinen suure on vakio, joka vaihtelee käyrien välillä. Polttoaineen rakennetta laskettaessa polttoaine voidaan jakaa kahteen muuhun komponenttiin. Tällä pystytään kuvaamaan paremmin polttoaineen rakenteen törmäystä kaasuturbiinin suorituskäyvissä.(7.)

Määritelmän mukaan algebran yhtälöistä voidaan luoda yhtenäinen kaava, joko kahden muuttujan yhtälöinä tai useina yhden muuttujan yhtälöinä. Jokainen yhtälö antaa eri korjauskertoimen eri arvoille korjauskäyrien graafisessa tulkinnassa. On välttämätöntä hankkia pisteitä taulukosta, jotka heijastavat riippumattomuus ja riippuvien välistä suhdetta yli määrittelyalueen. On myös suositeltavaa, että yhtälöt ja/tai graafinen esitys toimitetaan kaasuturbiinin muiden papereiden joukossa.(7.)

#### 4.3.2 Korjauskertoimet



Sähköisen tai mekaanisen tehon mittaaminen ja kaasuturbiinin polttoaineen lämmön kulutus ovat tärkeitä suorituskyvyn testejä. Riittävän tukeva tieto tulee tallentaa. Tämä mahdollistaa testien tulosten korjaamisen suositeltaviin olosuhteisiin, lisäksi tulosten tallennus täyttää velvoitteet asianomaisista sopimuksista. Tällöin testien tuloksia voidaan verrata kaasuturbiinin määritelyihin olosuhteisiin ja määrittää kyseessä olevan turbiinin kyvykkyys. Korjauskäyrät pitäisi antaa ennen testiä. Elintärkeää on myös, että testiraja tai vaippa, joka ympäröi kaasuturbiinia, on vakavarainen. Kaikki purot taserajan yli tulee tunnistaa ja määritellä.(7.)

Korjauskertoimet on erikseen määritelty osana kyseessä olevan testin aloitusta. Kaikki määritelmät on tehty suorituskyvyn mittaamiseksi ja ne on täytynyt määritellä sopimuksen mukaisesti, riippuen kaasuturbiinin rakenteesta. Ylimääräiset korjauskertoimet on sovellettava, jos on tarpeellista. Korjauskertoimet, jotka ovat sopimattomia saavat arvon yksi, kun kyseessä on kerrannaisvaikutus ja nollan, kun kyseessä on lisäaine.(7.)

Pääosin korjauskertoimet on johdettu valmistajilta saaduista korjauskäyristä. Käyrä on kuvaaja toiminnalle, miten prosessi käyttäytyy standardin tai ihanneolosuhteiden ympärillä. Useampi korjauskäyrä voi olla kahden muunnos. Tässä tapauksessa korjaus on kahden muuttujan funktio. Korjauskäyriä muodostettaessa, korjausarvot on luotu muuttamalla vain yhtä muuttujaa kerrallaan. Sarjoja on luotu kuitenkin useampia. Toinen muuttuja on vaihdettu sarjojen välissä. Graafinen esitys tällaisesta korjauksesta ilmenee käyrien ryhmänä, jossa toinen muuttuja on vakio yhdessä käyrässä, mutta vaihtelee käyrien välillä. Lisäyksenä korjauskäyriin polynomien yhtälö käyrälle tai interpolointia varten lista kantapisteistä voidaan antaa yksinkertaistamaan korjausmenettelyn arviointia testituloksista ja välttää väärä tulkinta korjauskäyriä luettaessa. (7.)

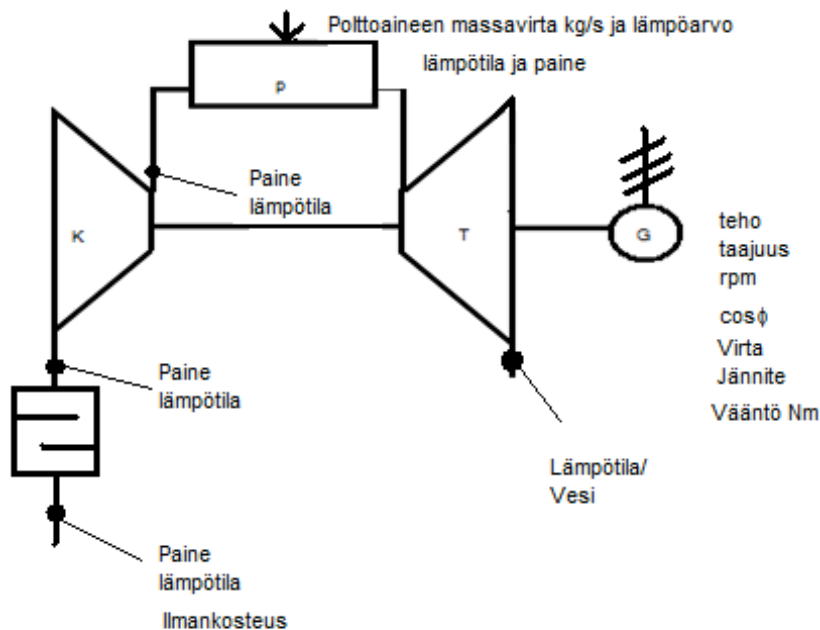
Standardi summaa korjauskertoimet ulostulevaksi tehoksi, lämpötehoksi ja turbiinin lämpötilan toimintapisteeksi. Näitä ovat seuraavat: ympäristön ilmanpaine, ympäristön lämpötila, suhteellinen kosteus, generaattorin tehokerroin, generaattorin taajuus, sisään virtaavan ilman painehäviö, ulos

virtaavan ilman painehäviö, ruiskutus nesteen virtaus, polttoaineen koostumus, lämmön erottaminen ja rappeutuminen. (7.)

Näiden edellä mainittujen korjauksiin liittyvien ohjeiden lisäksi standardi sisältää useita korjauskertoimiin liittyviä laskennallisia ohjeita, joita ei tarvitse kuitenkaan tuoda esille.

## 5. OPINNÄYTETYÖN KESKEISET MITATTAVAT SUUREET

Ohjelman ja opinnäytetyön toteuttamista varten, jokaiselta ohjelman käyttöön haluavalla voimalaitoksella täytyy olla tiettyjä mittaustietoja omasta prosessistaan. Näiden mittaustietojen oikeellisuus ja tarpeellisuus on välttämätöntä ohjelmiston toiminnan kannalta.



Kuva 4. Kaasuturbiinin mittaukset.

Kuvassa 4 näkyvät mittaustiedot on välttämättömiä sekä ohjelman että korjauskertoimien laskemisen kannalta. Mittaustiedot, jotka turbiinista on saatava korjauskertoimien takia, ovat ilmanpaine, ilmankosteus, ilmanlämpötila, teho, tehokerroin  $\cos\Phi$ , taajuus ja pyörimisnopeus. Lisäksi halutaan vielä tietää jäähdytysveden lämpötila.

Muita hyviä tietoja ovat suodatin- ja esilämmitinpaketin tai pelkän suodattimen jälkeinen paine ja lämpötila. Nämä kertovat, kuinka likaisia suodattimet ovat, eli aiheuttavatko ne paljon painehäviötä. Laskentaohjelman kannalta tärkeitä tietoja ovat myös polttoaineen massavirta ja lämpöarvo sekä päästöjen määrä. Lämpöarvoon liittyy vielä keskeisesti C/H-ratio eli massasuhte, eli hiilen C ja vedyn H välinen massajakauma.

Muita mitattavia suureita on vielä kompressorin jälkeinen lämpötila ja paine. Syötettävän polttoaineen paine ja lämpötila sekä generaattorin jännite, virta ja vääntömomentti. Nämä mittausarvot eivät ole laskennan kannalta kuitenkaan tärkeitä suureita.

Täytyy myös huolehtia, että kaikki saadut arvot noudattavat laskentaohjelmaan säädettyjä yksiköitä, jotka on mainittuna kohdassa 6.2. Yksiköt ollessa jokin muu se täytyy muuttaa laskentaohjelmaan sopivaksi virheiden välttämiseksi.

## 6. LASKENTAOHJELMAN TIEDOT

### 6.1 Käytetyt korjauskertoimet

opinnäytetyön rajaamiseksi päätettiin keskittyä pelkästään kaasuturbiinilaitoksiin, eikä otettu tarkisteluun lainkaan kombivoimalaitoksia erilaisine variaatioineen. Ainoa ero näissä kahdessa laitostyyppissä on se, että kombityyppisessä sovelluksessa taserajakäsite laajenee ja huomioitavaa dataa tulee huomattavasti enemmän.

ISO/DIS 2314-standardin avulla pystyttiin rajaamaan tarkasteltavat korjauskertoimet viiteen. Jokaisella valmistajalla tulisi olla kyseisistä turbiineista seuraavat korjauskäyrät: Ambient Air Temperature (ympäristön lämpötila), Ambient Air Relative Humidity (ympäristön ilmankosteus), Barometric Pressure (ilmanpaine), Generator Power Factor (generaattorin tehokerroin ja Gas Turbine Speed (kaasuturbiinin pyörimisnopeus). Näiden

viiden korjauskäyrän tiedot pitäisi riittää turbiinin hyötysuhteen korjaamiseen laskentamallissa. Lisäksi standardissa puhutaan monista muista turbiiniin vaikuttavista asioista, mutta niiden vaikutusta ei korjata korjauskertoimilla. Tarkasteluun otettiin mukaan myös yksi standardin ulkopuolinen korjauskäyrä toimeksiantajan pyynnöstä. Kyseinen käyrä oli Cooling Water Temperature (jäähdytysveden lämpötila), ja tämä käyrä liittyy keskeisesti kombivoimalaitokseen.

## 6.2 Laskentaohjelman yksiköt

Onnistuneen lopputuloksen saavuttamiseksi valittiin laskentaohjelmalle yksiköt, joihin jokainen korjauskäyrä ja suureet on muutettava ennen kuin niitä voi käyttää laskentaohjelmassa. Kyseiset suureet on valittu pääosin Suomessakin käytössä olevan SI-järjestelmän mukaan ja niiden noudattaminen on välttämätöntä oikean vastauksen saamiseksi.

Taulukko 1. Korjauskertoimien keskeiset suureet ja yksiköt

| SUURE                    | YKSIKKÖ      |
|--------------------------|--------------|
| Polttoaineen massavirta  | kg/s         |
| Ympäristön ilmanpaine    | Pa           |
| Ympäristön lämpötila     | °C           |
| Ilmankosteus             | %            |
| taajuus                  | Hz, 1/s      |
| pyörimisnopeus           | rpm, n/60    |
| teho                     | kW           |
| Virta                    | A            |
| Jännite                  | V            |
| Lämpöarvo                | kJ/kg        |
| Tehokerroin              | cosΦ         |
| Massasuhde C/H           | mol % / mol% |
| Jäähdytysveden lämpötila | °C           |

### 6.3 Kaavat ja yksikön muunnokset

Laskentaohjelmassa tarvittavat yksikönmuunnokset ovat seuraavat:

Massa m (kg):

$$1\text{lb} = 0,4536\text{kg}$$

Paine p (Pa) :

$$1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$$

$$1\text{psi} = 6,894757 * 10^3\text{Pa}$$

Lämpötila T (°C):

$$^{\circ}\text{C} = 273,15\text{K}$$

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32)/1,8$$

Ilman kosteus prosentti:

Ilman suhteellinen kosteus saadaan, kun ilmassa olevan vesihöyryn osapaine jaetaan samaa lämpötilaa vastaavalla kylläisen vesihöyryn paineella:

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{kv}}$$

$\varphi$  = ilman suhteellinen kosteus-%

$p_v$  =vesihöyryn osapaine (mbar)

$p_{kv}$  =kylläisen vesihöyryn paine ko. lämpötilassa (mbar)

Kylläisen vesihöyryn paine ja tiheys k. Maol s.80

Teho P (W):

$$1\text{hv} = 735,5\text{W}$$

Massasuhde C/H-ratio (mol %/mol %):

Hiilen ja vedyn välinen massajakauma lasketaan jakamalla hiilen moolimassa vedyn moolimassalla. Laskennassa täytyy muistaa, että massasuhteeseen vaikuttaa myös hiilen isotoopit.

## 7. KORJAUSKÄYRÄT

Korjauskäyrät saatiin valmiina joko tehtailta tai suoraan valmistajilta. Tehtäväkseni jäi muuttaa yksiköt laskentaohjelmalle suotuisaksi ja tehdä korjauskäyrästä xy-taulukko ja sijoittaa siihen käyrän pisteet oikeilla yksiköillä. (Liitteet 1,2,3 ja 4)

Tämän jälkeen piirsin Excel-kuvaajan taulukon tiedoista. (Liitteet 1,2,3 ja 4)

Kuvaajan piirtämisen toteutus:

Valitaan Excelistä **lisää**-valikosta **kaaviot ja piste**.

Painetaan hiiren vasenta näppäintä kaavion päällä, jolloin aukeaa valikko, josta valitaan **valitse tiedot**.

Tietolähteen valitseminen välilehdestä otetaan **lisää** painike, jolloin avautuu muokkaa sarjoja-välilehti.

Välilehteen merkitään sarjan nimi eli kaavion otsikko sekä x- ja y-akseleille tulevat arvot xy- taulukosta.

Tämän jälkeen valitaan **OK** ja **OK**, jolloin Excel piirtää korjauskäyrän kuvaajaan.

Kaava saadaan näkyviin painamalla korjauskäyrän päällä hiiren vasenta näppäintä, tällöin avautuu valikko, josta valitaan **lisää trendiviiva**.

Trendiviiva-asetuksista voidaan valita, millainen trendiviiva halutaan piirtää. Trendiviivaksi valitaan suorilla lineaarinen ja muilla käyrillä polynominen.

Polynomisella voidaan valita myös järjestys. Tämä kertoo, montako eksponenttia kaavassa on. Eksponenttien määrä valitaan siten, että syntynyt trendiviiva noudattelee mahdollisimman tarkasti oikeaa korjauskäyrää.

Rastittamalla ruutu **näytä kaava kaaviossa** tekstin edestä, saadaan kaava trendiviivan kaava näkymään kaaviossa.

Tämä kaava on kyseisen korjauskäyrän kaava, eli kaava jolla saadaan tietää korjauskerroin, kun tiedetään  $x$ :n arvo.

$X$ :n arvo saadaan prosessin kulloisestakin tilasta eli esimerkiksi, jos ulkolämpötila on  $10^{\circ}\text{C}$ , niin  $x$  on 10.

Laskennassa täytyy ottaa huomioon myös kaasuturbiinin fyysiset rajoitukset, esimerkiksi turbiinia ei voi pyörittää täysillä kovilla pakkasilla, vaikka teho kaavojen mukaan vain nousisi. Tämä aiheuttaa turbiinille ns.

ryntäämismahdollisuuden, jolloin turbiini vahingoittuisi. Tästä syystä turbiiniin johtavaa ilmavirtaa rajoitetaan kääntämällä IGV:n siipiä kiinnipäin.

## 8. KEHITTÄMISKOHTEET

Ohjelmiston kannalta suurimpana kehityskohteena voisi mainita mahdollisuuden käsitellä myös kombivoimalaitoksia. Ensin on kuitenkin testattava ja kehitettävä laskentamalli sellaiseksi, että se pitää varmasti paikkansa joka tilanteessa.

Uskon laskentaohjelman ja korjauskertoimien kehittyvän tukevaisuudessa, mitä enemmän tietoja laskentaohjelmaan pääsee syöttämään.

Korjauskertoimista tekee hankalia myös niiden luonne. Jotkut korjauskertoimet tulevat suoraan turbiinista, toiset puolestaan generaattorista ja prosessista. Ainakin tehokertoimen puute korjauskäyrissä viittaisi sen olevan luonteen ja kaavan  $\cos\Phi$  puolesta pikemminkin verkon ja generaattorin käyrä kuin turbiinin. Tulevaisuudessa olisi hyvä tietää laitekokoonpano, jotta niiden korjauskertoimet olisi helpompi löytää.

Kehittämiskohteena voidaan myös mainita tietojen saanti ja jaottelu, joka osoittautui joidenkin turbiinien kohteilla hankalaksi.

## 9. YHTEENVETO

Kokonaisuutena voisin sanoa työn onnistuneen kohtalaisen hyvin, vaikka korjauskäyrien tietojen saannissa olikin vähän ongelmia. En löytänyt tilanteita, jolloin korjauskertoimen voisi olettaa olevan yksi. Tosin jotkut korjauskertoimista ovat niin pieniä, ettei niillä ole suurta vaikutusta tehoon. Kaasuturbiinien kaavoille ei voitu näin pienen otoksen kohdalla nähdä suoraa yhtäläisyyttä. Muilta osin korjauskäyrät täyttävät laskentamallin tarpeet ja niitä voidaan käyttää tehon ja hyötysuhteen laskentaan osana laskentaohjelmaa.



## LÄHTEET

1. Vapaa tietosanakirja, wikipedia,  
[http://fi.wikipedia.org/wiki/Kansainvälinenlinen\\_yksikköjärjestelmä](http://fi.wikipedia.org/wiki/Kansainvälinenlinen_yksikköjärjestelmä), 6.4.2011
2. Huhtinen, Markku. Voimalaitostekniikka- kurssin materiaali, Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. 2009
3. Eagle filters, etusivu, Saatavissa:  
[http://www.eaglefilter.fi/index.php?option=com\\_content&task=view&id=16&Itemid=44](http://www.eaglefilter.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=16&Itemid=44),  
viitattu 30.3.2011
4. Profimill Oy, etusivu, saatavissa:  
[http://www.profimill-engineering.fi/Profimill Engineering Oy](http://www.profimill-engineering.fi/Profimill_Engineering_Oy), viitattu 30.3.2011
5. Gas Turbine Power Plant . 2.4.2011, power point esitys. Profimill Oy
6. Perttula, Jarmo, Energiatekniikka. Porvoo WS Bookwell Oy. 2000
7. Kaasuturbiinien- hyväksymistesti, ISO/DIS 2314 Standardi. 2007. Tarkistettu toinen painos ISO 2314:1989.

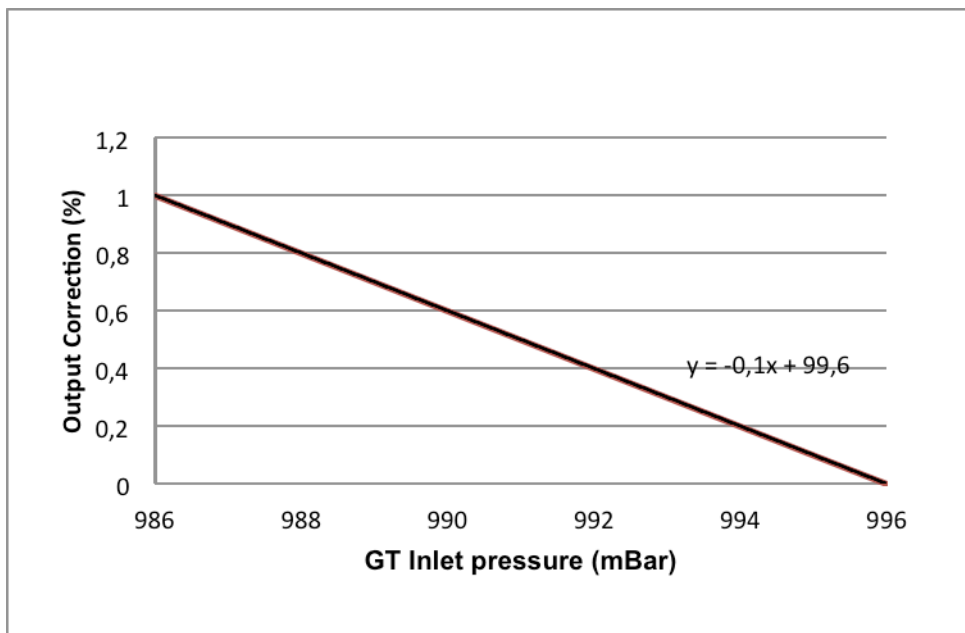




Kaasuturbiinin kojauskäyrien määrittäminen:  
Siemens AG Drawing No.:5631a

Ilmanpaine  
(Barometric Pressure)

| Korjauskäyrä   |     |     |     |     |     |     |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\Delta p(\%)$ | 0   | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1   |
| Pbar           | 996 | 994 | 992 | 990 | 988 | 986 |



Korjauskäyrä on muotoa:  $\Delta p = -0,1P_{bar} + 99,6$

Ilmanpaine (mbar) 986

Korjauskerroin 1,0100

Kaasuturbiinin kojauskäyrien määrittäminen:

GE MS6001, MS 7001,

MS9001

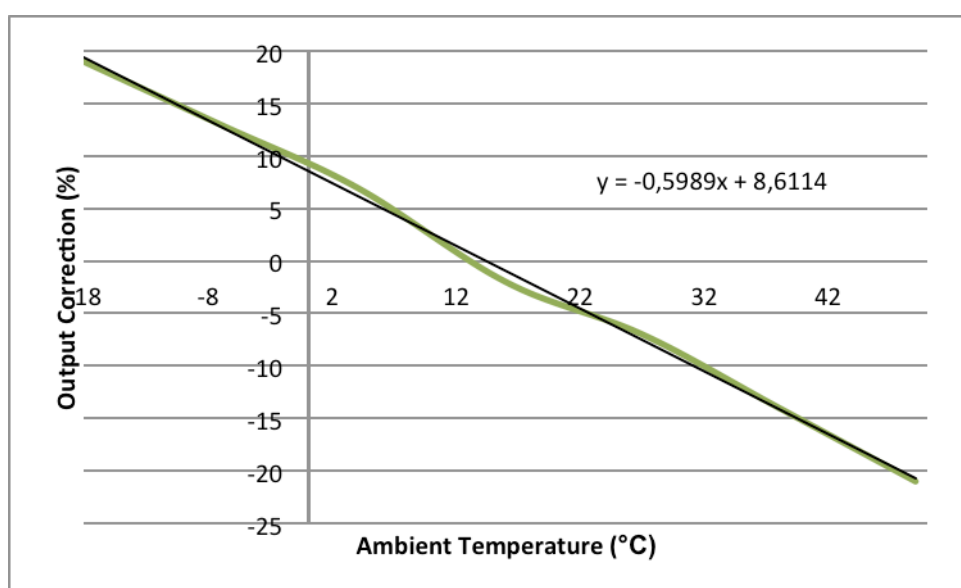
(kotkantehtaat)

522HA709 REV-1

Ympäristön lämpötilan vaikutus korjauskertoimeen:

(Ambient Air Temperature)

| Korjauskäyrä   |     |    |   |    |    |     |     |
|----------------|-----|----|---|----|----|-----|-----|
| $\Delta T(\%)$ | 19  | 13 | 7 | -2 | -7 | -14 | -21 |
| $T_{amb}$      | -18 | -7 | 4 | 16 | 27 | 38  | 49  |



Korjauskäyrä on muotoa:  $\Delta T = -0,5989T_{amb} - 8,6114$

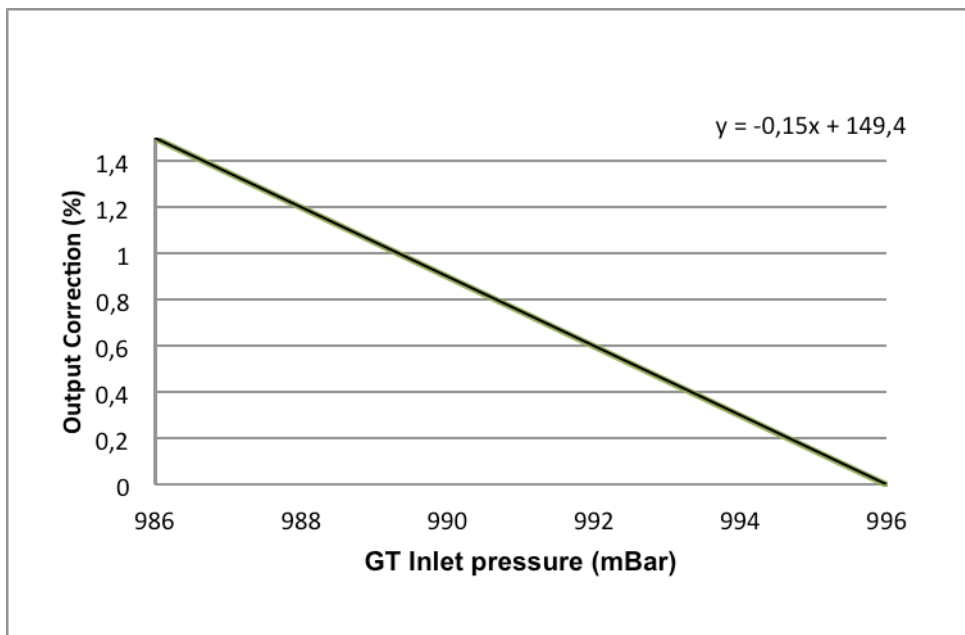
Ulkolämpötila (°C) 18

Korjauskerroin 0,978312

Kaasuturbiinin kojauskäyrien määrittäminen:  
 GE MS6001, MS 7001,  
 MS9001 (kotkantehtaat)

Ilmanpaine  
 (Barometric Pressure)

| Korjauskäyrä   |     |     |     |     |     |     |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\Delta p(\%)$ | 0   | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 1,5 |
| Pbar           | 996 | 994 | 992 | 990 | 988 | 986 |



Korjauskäyrä on muotoa:  $\Delta p = -0,15P_{\text{bar}} + 149,4$

Ilmanpaine (mbar) 1001

Korjauskerroin 0,9925

Kaasuturbiinin kojauskäyrien määrittäminen:

Kotkan tehtaat MS6001, MS7001 ja MS9001 498HA697 REV B

Suhteellinen ilmankosteus:

$\gamma = X/X_{max}$  (%)                      ilmanlämpötilan oletettu olevan 20°C, jolloin  $X_{max} = 17,29 \text{ g/m}^3$

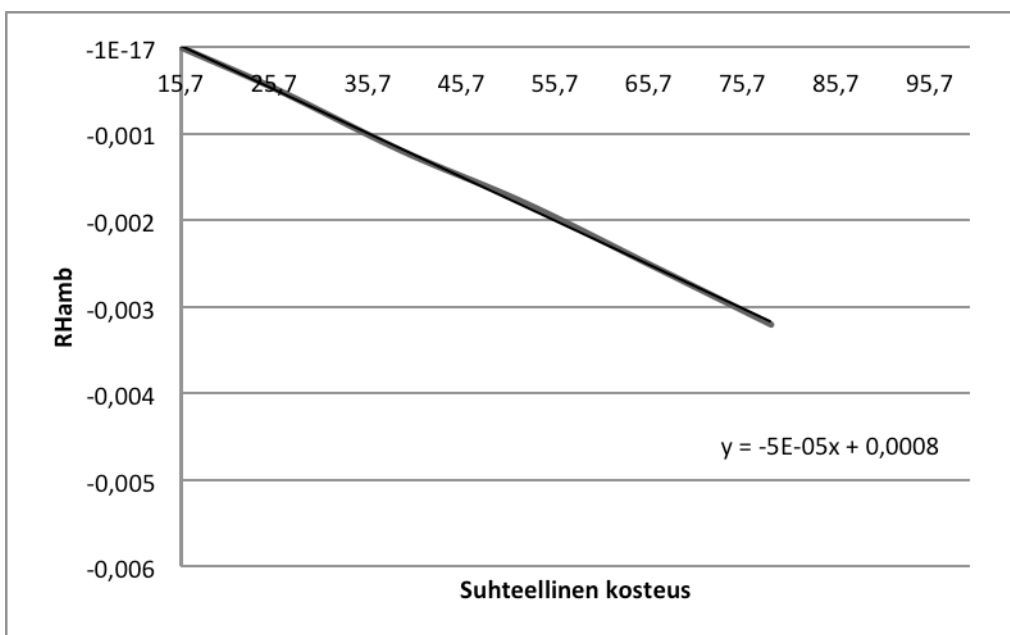
lasketaan suhteelliset kosteudet kun tiedetään Water (lb)/ bry air (lb)

| X (lb/lb) | Xmax (g/m³) | lb=g  | $\gamma$ |
|-----------|-------------|-------|----------|
| 0,006     | 17,29       | 453,6 | 15,7     |
| 0,01      | 17,29       | 453,6 | 26,2     |
| 0,015     | 17,29       | 453,6 | 39,4     |
| 0,02      | 17,29       | 453,6 | 52,5     |
| 0,025     | 17,29       | 453,6 | 65,6     |
| 0,03      | 17,29       | 453,6 | 78,7     |

Ilmankosteus

(Relative Humidity)

| Korjauskäyrä    |      |      |      |         |         |         |
|-----------------|------|------|------|---------|---------|---------|
| $\Delta RH(\%)$ | 0    | -    | -    | -0,0018 | -0,0025 | -0,0032 |
| RHamb           | 15,7 | 26,2 | 39,4 | 52,5    | 65,6    | 78,7    |



|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Korjauskäyrä on muotoa:         | $\Delta RH = -5 \cdot 10^{-5} \cdot RH_{amb} + 0,0008$ |
| Suhteellinen kosteus $RH_{amb}$ | 15,7   |
| Korjauskerroin                  | 1,0000   |



KÄSIN LASKETUT KORJAUSKÄYRIEN KAAVAT SIEMENS 94.3A-2 TURBIINILLE  
 KORJAUSKÄYRÄ TEHOLLE PYÖRIMISNOPEUDEN MUKAAN ERI LÄMPÖTILOILLA

Korjauskäyrä ulkolämpötilalla 45°C:

$$y_1 = 0,963 \quad x_1 = 2960rpm \quad y_2 = 1,034 \quad x_2 = 3040rpm$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1)$$

$$x - 0,963 = \frac{1,034 - 0,963}{3040 - 2960} * (x - 2960)$$

$$y - 0,963 = 8,9 * 10^{-4} * (x - 2960)$$

$$y = 8,9 * 10^{-4}x - 1,664$$

Korjauskäyrä ulkolämpötilalla 30°C:

$$y_1 = 0,97 \quad x_1 = 2955rpm \quad y_2 = 1,0216 \quad x_2 = 3045rpm$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1)$$

$$x - 0,97 = \frac{1,0216 - 0,97}{3045 - 2955} * (x - 2955)$$

$$y = 5,73 * 10^{-4}x - 0,7242$$

Korjauskäyrä ulkolämpötilalla 15°C:

$$y_1 = 0,9835 \quad x_1 = 2955rpm \quad y_2 = 1,008 \quad x_2 = 3045rpm$$

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1)$$

$$x - 0,9835 = \frac{1,008 - 0,9835}{3045 - 2955} * (x - 2955)$$

$$y = 2,72 * 10^{-4}x + 0,179$$

Korjauskäyrä ulkolämpötilalla 15°C:

$$y_0 = 1 \quad x_0 = 3000 \quad x = 3060 \quad y = 0,995$$

$$y - y_0 = -a(x - x_0)^2$$

$$y - y_0 = -a(x - x_0)(x + x_0)$$

$$y - y_0 = -a(x^2 - 2xx_0 + x_0^2)$$

$$y - 1 = -a(x^2 - 2 * 3000 * x + 3000^2)$$

$$y - 1 = -a(x^2 - 6000x + 9000000)$$

$$0,995 - 1 = -a(3060^2 - 6000 * 3060 + 9000000)$$

$$-0,005 = -3600a$$

$$a = \frac{-0,005}{-3600}$$

$$a = 1,4 * 10^{-6}$$

$$y_2 - y_0 = -a(x_2 - x_0)^2$$

$$y_2 - 1 = -1,4 * 10^{-6}(x_2 - 3000)^2$$

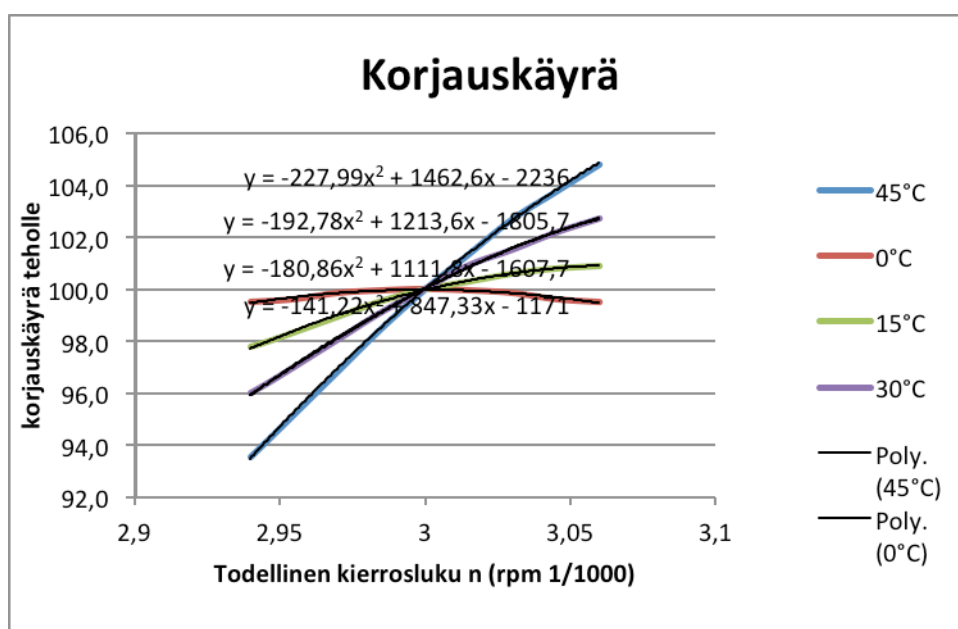
$$y_2 - 1 = -1,4 * 10^{-6}(x_2^2 - 2x_2 * 3000 + 9000000)$$

$$y_2 = -1,4 * 10^{-6}x_2^2 + 8,4 * 10^{-3}x_2 - 11,6$$



## Siemens 94.3A-2 turbiinin korjauskäyrä teholle pyörimisnopeuden mukaan eri lämpötiloilla

| Korjauskäyrä                   |      |       |      |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| tod. n(rpm)                    | 2,94 | 2,955 | 2,97 | 2,985 | 3     | 3,015 | 3,03  | 3,045 | 3,06  |
| $\Delta P(\%)$ / ulkolämpötila |      |       |      |       |       |       |       |       |       |
| 0°C                            | 99,5 | 99,6  | 99,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 99,9  | 99,6  | 99,5  |
| 15°C                           | 97,8 | 98,4  | 99,0 | 99,6  | 100,0 | 100,3 | 100,6 | 100,8 | 100,9 |
| 30°C                           | 96,0 | 97,0  | 98,1 | 99,1  | 100,0 | 100,9 | 101,5 | 102,2 | 102,7 |
| 45°C                           | 93,6 | 95,2  | 96,9 | 98,5  | 100,0 | 101,4 | 102,7 | 103,8 | 104,8 |



### ulkolämpötila      asetusarvo      Kaava

|      |      |       |
|------|------|-------|
| 0°C  | 3000 | 1     |
| 15°C | 3000 | 0,995 |
| 30°C | 3000 | 0,995 |
| 45°C | 3000 | 1,006 |

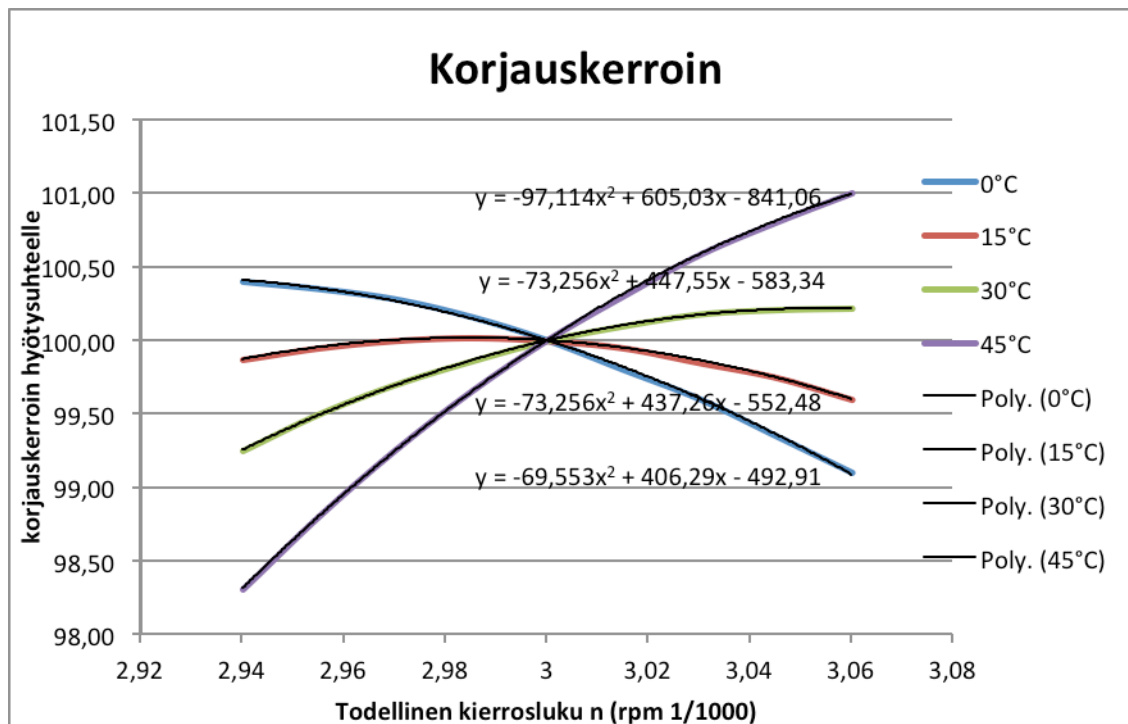
Käsin lasketut kaavat

### 2.aste

|      |      |      |
|------|------|------|
| 0°C  | 2,94 | 99,5 |
| 15°C | 2,94 | 97,7 |
| 30°C | 2,94 | 96,0 |
| 45°C | 2,94 | 93,4 |

**Siemens 94.3A-2 turbiinin korjauskäyrä  
hyötysuhteelle pyörimisnopeuden mukaan eri lämpötiloilla**

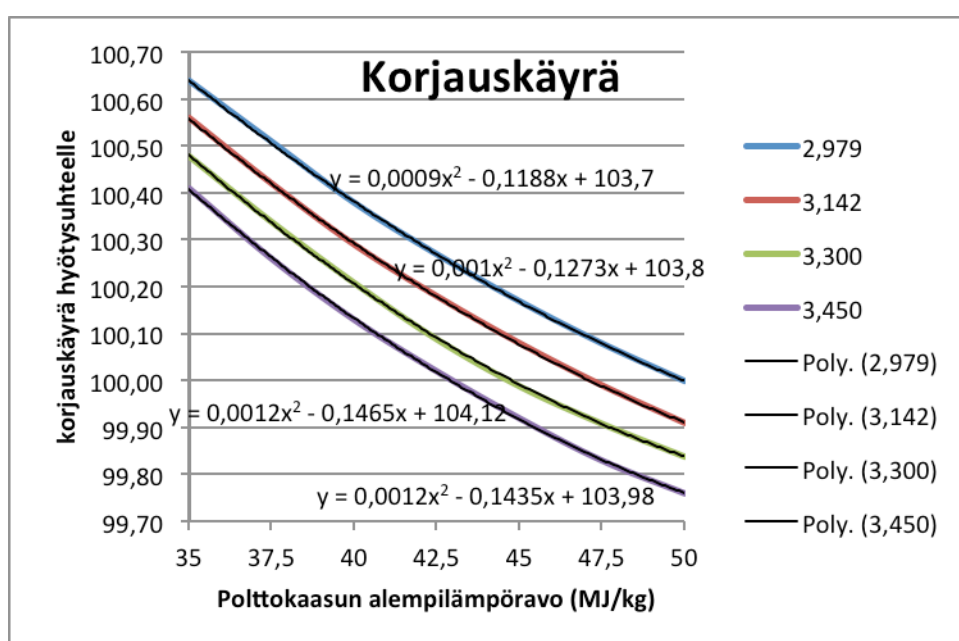
| Korjauskäyrä                   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| tod. n(rpm)                    | 2,94   | 2,955  | 2,97   | 2,985  | 3      | 3,015  | 3,03   | 3,045  | 3,06   |
| $\Delta P(\%)$ / ulkolämpötila |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 0°C                            | 100,40 | 100,35 | 100,28 | 100,16 | 100,00 | 99,80  | 99,60  | 99,35  | 99,10  |
| 15°C                           | 99,87  | 99,95  | 100,00 | 100,02 | 100,00 | 99,95  | 99,85  | 99,75  | 99,60  |
| 30°C                           | 99,25  | 99,50  | 99,70  | 99,86  | 100,00 | 100,10 | 100,18 | 100,21 | 100,22 |
| 45°C                           | 98,30  | 98,80  | 99,25  | 99,65  | 100,00 | 100,30 | 100,58 | 100,80 | 101,00 |



| ulkolämpötila | asetusarvo | Kaava<br>2.aste |
|---------------|------------|-----------------|
| 0°C           | 3,06       | 99,1            |
| 15°C          | 3,06       | 99,6            |
| 30°C          | 3,06       | 100,2           |
| 45°C          | 3,06       | 101,0           |

**Siemens 94.3A-2 turbiinin korjauskäyrä  
hyötysuhteelle polttokaasun alemman lämpöarvon mukaan**

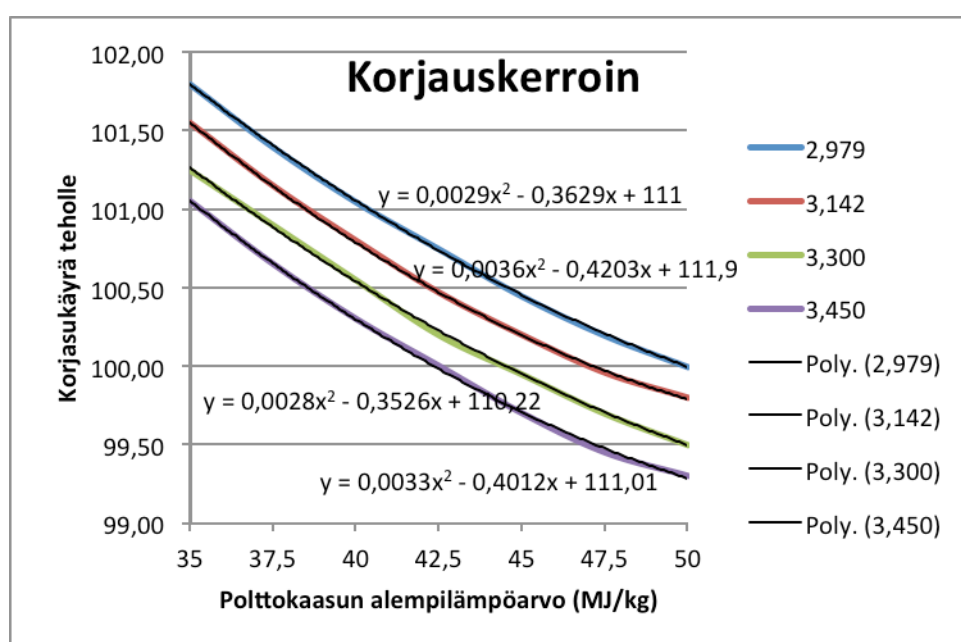
| Korjauskäyrä   |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AL. Polttokaasu (MJ/kg)  | 35     | 37,5   | 40     | 42,5   | 45     | 47,5   | 50     |
| Hiilen ja vedyn massasuhteen vaikutus hyötysuhteeseen (C/H MR) |        |        |        |        |        |        |        |
| 2,979  | 100,64 | 100,51 | 100,38 | 100,27 | 100,17 | 100,08 | 100,00 |
| 3,142  | 100,56 | 100,42 | 100,29 | 100,18 | 100,08 | 99,99  | 99,91  |
| 3,300  | 100,48 | 100,34 | 100,21 | 100,09 | 99,99  | 99,91  | 99,84  |
| 3,450  | 100,41 | 100,26 | 100,13 | 100,02 | 99,92  | 99,83  | 99,76  |



| C/H Massasuhte | asetusarvo | Kaava<br>2.aste |
|----------------|------------|-----------------|
| 2,979          | 45         | 100,18          |
| 3,142          | 45         | 100,10          |
| 3,300          | 55         | 99,69           |
| 3,450          | 45         | 99,95           |

**Siemens 94.3A-2 turbiinin korjauskäyrä  
teholle polttokaasun alemman lämpöarvon mukaan**

| Korjauskäyrä  |        |        |        |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AL. Polttokaasu (MJ/kg)                               | 35     | 37,5   | 40     | 42,5   | 45     | 47,5   | 50     |
| Hiilen ja vedyn massasuhteen vaikutus tehoon (C/H MR) |        |        |        |        |        |        |        |
| 2,979   | 101,80 | 101,40 | 101,05 | 100,75 | 100,45 | 100,20 | 100,00 |
| 3,142   | 101,55 | 101,15 | 100,80 | 100,47 | 100,20 | 99,96  | 99,80  |
| 3,300   | 101,25 | 100,90 | 100,55 | 100,20 | 99,95  | 99,70  | 99,50  |
| 3,450   | 101,05 | 100,65 | 100,30 | 100,00 | 99,70  | 99,45  | 99,30  |

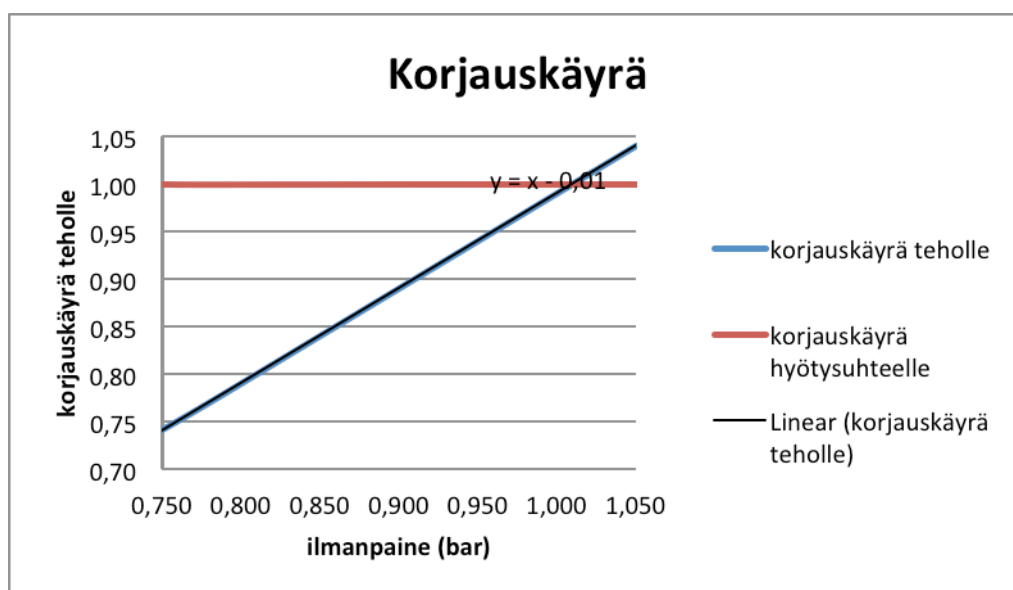


| C/H Massasuhte | asetusarvo | Kaava<br>2.aste |
|----------------|------------|-----------------|
| 2,979          | 35         | 101,85          |
| 3,142          | 35         | 101,60          |
| 3,300          | 35         | 101,31          |
| 3,450          | 35         | 101,01          |

## Ulkoilmanpaineen korjauskäyrä Siemens 94.3A-2 turbiinille

Ilmanpaine  
(Barometric Pressure)

| Korjauskäyrä                |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ilmanpaine (bar)            | 0,750 | 0,800 | 0,850 | 0,900 | 0,950 | 1,000 | 1,050 |
| korjauskäyrä teholle        | 0,74  | 0,79  | 0,84  | 0,89  | 0,94  | 0,99  | 1,04  |
| korjauskäyrä hyötysuhteelle | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  | 1,00  |



**Korjauskäyrä on muotoa:**

$$\Delta p = P_{\text{bar}} - 0,01$$

**Ilmanpaine (bar)**

0,75

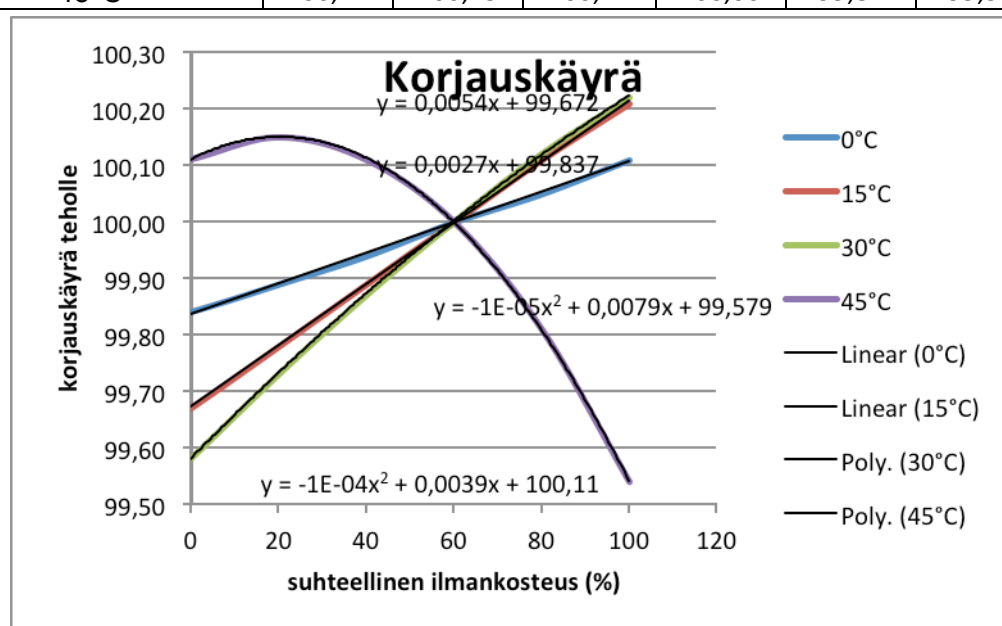
**Korjauskerroin teholle**

0,74



**Siemens 94.3A-2 turbiinin korjauskäyrä  
teholle suhteellisen ilmankosteuden mukaan eri lämpötiloilla**

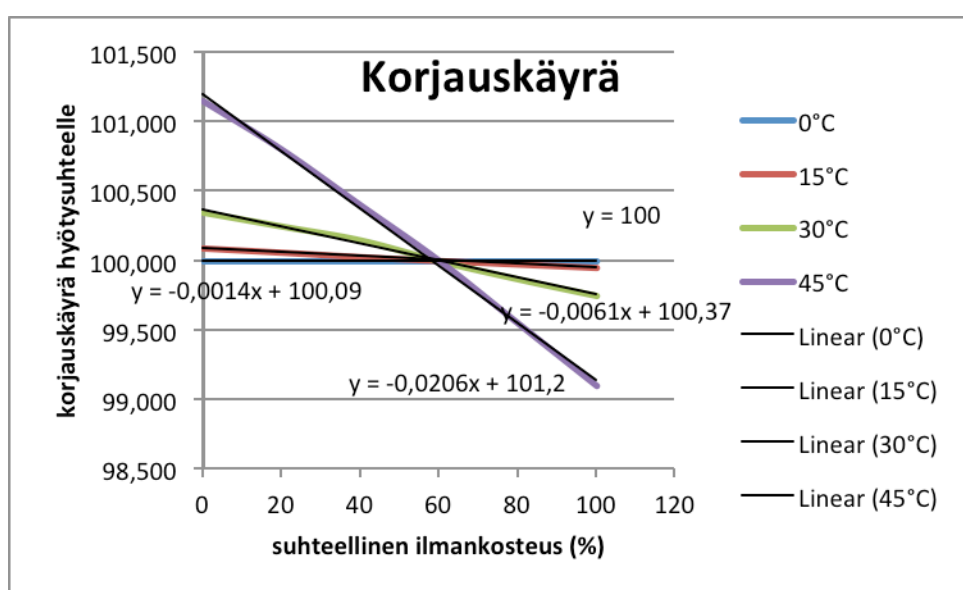
| Korjauskäyrä                                     |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| suht. Ilmankosteus %                             | 0      | 20     | 40     | 60     | 80     | 100    |
| ilmankosteuden vaikutus tehoon eri lämpötiloilla |        |        |        |        |        |        |
| 0°C  | 99,84  | 99,89  | 99,94  | 100,00 | 100,05 | 100,11 |
| 15°C   | 99,67  | 99,78  | 99,89  | 100,00 | 100,11 | 100,21 |
| 30°C   | 99,58  | 99,73  | 99,87  | 100,00 | 100,12 | 100,22 |
| 45°C   | 100,11 | 100,15 | 100,11 | 100,00 | 99,81  | 99,54  |



| ulkolämpötila | asetusarvo | Kaava  |
|---------------|------------|--------|
| 0°C           | 60         | 100,00 |
| 15°C          | 60         | 100,00 |
| 30°C          | 60         | 100,02 |
| 45°C          | 100        | 99,50  |

## Siemens 94.3A-2 turbiinin korjauskäyrä hyötysuhteelle suhteellisen ilmankosteuden mukaan eri lämpötiloilla

| Korjauskäyrä                                     |         |         |         |         |         |         |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| suht. Ilmankosteus %                             | 0       | 20      | 40      | 60      | 80      | 100     |
| ilmankosteuden vaikutus tehoon eri lämpötiloilla |         |         |         |         |         |         |
| 0°C  | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 100,000 |
| 15°C   | 100,090 | 100,060 | 100,028 | 100,000 | 99,975  | 99,950  |
| 30°C   | 100,350 | 100,250 | 100,150 | 100,000 | 99,870  | 99,750  |
| 45°C   | 101,150 | 100,800 | 100,400 | 100,000 | 99,550  | 99,100  |

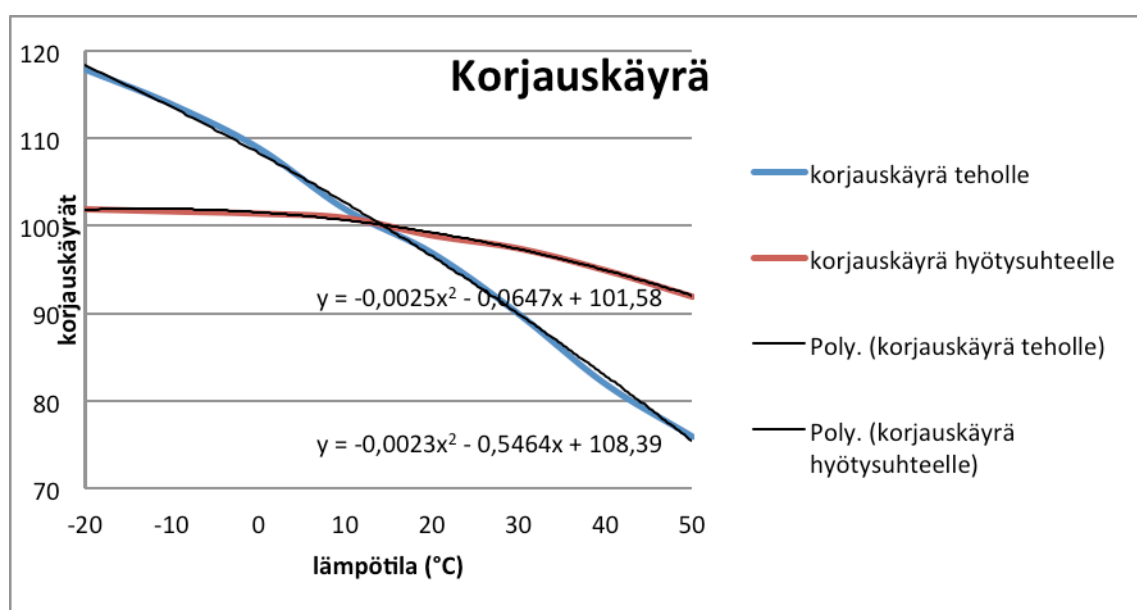


| ulkolämpötila | asetusarvo | Kaava  |
|---------------|------------|--------|
| 0°C           | 0          | 100,00 |
| 15°C          | 60         | 100,01 |
| 30°C          | 100        | 99,76  |
| 45°C          | 60         | 99,96  |

**kompressorin tuloilman lämpötilan korjauskäyrä Siemens 94.3A-2 turbiinille**

Ympäristön lämpötila  
(Ambient Air Temperature)

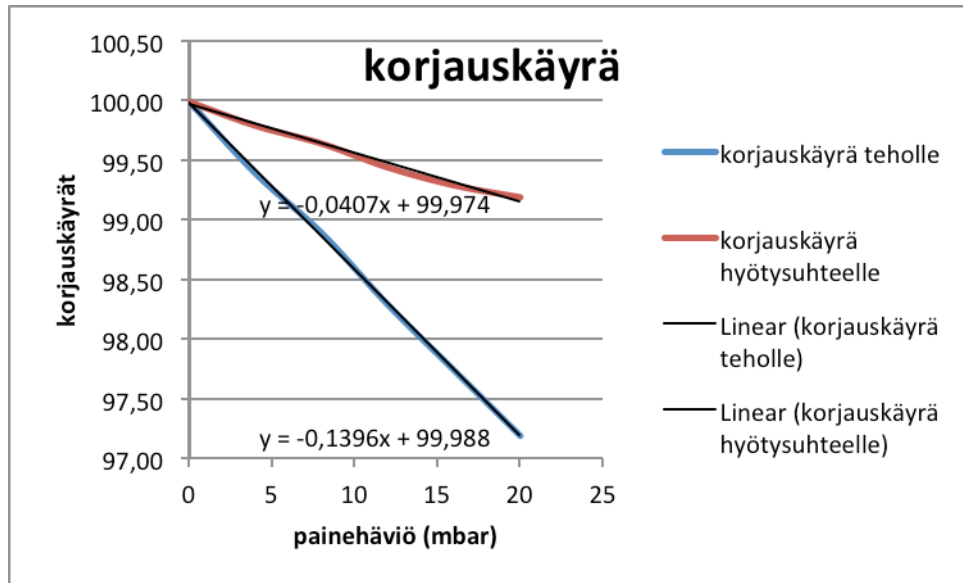
| Korjauskäyrä                |        |        |        |        |       |       |       |    |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|----|
| lämpötila (°C)              | -20    | -10    | 0      | 10     | 20    | 30    | 40    | 50 |
| korjauskäyrä teholle        | 118    | 114    | 109    | 102    | 97    | 90    | 82    | 76 |
| korjauskäyrä hyötysuhteelle | 102,00 | 101,75 | 101,50 | 101,00 | 99,00 | 97,50 | 95,00 | 92 |



|                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| <b>Ilmanpaine (bar)</b>              | 15     |
| <b>Korjauskerroin teholle</b>        | 99,68  |
| <b>Korjauskerroin hyötysuhteelle</b> | 100,05 |

## korjauskäyrä tulopaineen häviölle ennen kompressoria Siemens 94.3A-2 turbiini

| Korjauskäyrä                       |        |       |       |       |       |       |
|------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>painehäviö (mbar)</b>           | 0      | 4     | 8     | 12    | 16    | 20    |
| <b>korjauskäyrä teholle</b>        | 100,00 | 99,40 | 98,90 | 98,30 | 97,75 | 97,20 |
| <b>korjauskäyrä hyötysuhteelle</b> | 100,00 | 99,80 | 99,65 | 99,45 | 99,30 | 99,20 |



|                                      |        |
|--------------------------------------|--------|
| <b>painehäviö (mbar)</b>             | 0      |
| <b>Korjauskerroin teholle</b>        | 99,99  |
| <b>korjauskerroin hyötysuhteelle</b> | 99,974 |