

Opinnäytetyö (AMK)  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Konetekniikka  
2016

Masi Malin

# OTTOMOOTTORIN AHTAMINEN



**TURUN AMMATTIKORKEAKOULU**  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka | Konetekniikka

Marraskuu 2016 | Sivumäärä 32

Valvoja: Mika Lauren

Masi Malin

## OTTOMOOTTORIN AHTAMINEN

Ahdin on nykyaikaa, ja sitä käytetään nykyään lähes jokaisessa moottorissa, koska ahtimen avulla saadaan iskutilavuudet moottorissa pienennettyä, mikä taas pudottaa moottorin painoa. Polttoainekulutus pienenee myös ja päästöt saadaan matalammaksi. Tutkimuksen tavoitteena on tutkia erilaisia ahtimia ja selvittää ahtimen mitoitusmenetelmää moottoriin. Laskelmien tavoitteena on selvittää, miten pakokaasuahdin mitoitetaan ja mitä asioita tulisi ottaa huomioon mitoituksessa.

Teoriaosassa käsitellään pakokaasuahtamista, mekaanista ahtamista, ruuviahtamista, paineaaltoahtamista ja kaksivaiheahtamista. Tämän jälkeen perehdyttiin ahtoilman jäähdyttämiseen, koska se on hyötysuhteen parantamisen ja moottorin kestävyuden kannalta olennainen asia. Teoriaosan lopussa esitellään pakokaasuahtimien kehitystä 2000-luvulla.

Tutkimuksessa tehtiin esimerkkilaskelma ahtimen mitoittamisesta. Keskeisimpänä havaintona todettiin, että ahtimen oikea mitoittaminen on todella tärkeää. Väärin mitoitettu ahdin ei toimi halutulla tavalla ja pahimmassa tapauksessa voi rikkoa koko moottorin. Ahtimen valinta on aina kompromissi, mutta tärkeintä on pysyä mahdollisimman hyvällä hyötysuhdealueella kompressorikartassa ja poissa sakkaurajalta.

### ASIASANAT:

Ottomoottori, ahtaminen, pakokaasuahdin, ahtimen kehitys, ahtimen mitoittaminen

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical and Product Engineering | Mechanical Engineering

November 2016 | Total number of pages 32

Instructor: Mika Lauren

Masi Malin

## THE CHARGING OF AN OTTO-CYCLE ENGINE

Currently turbocharging is used almost in every engine. It is because the engine cylinder capacity can be reduced with a turbocharger and this reduces the weight of the engine. This will also reduce the fuel consumption and pollution. The aim of this thesis was to research various chargers and sizing methods for a turbocharger. The aim of the recalculations was to give information to the readers about the sizing of the turbochargers and points to be considered while sizing the turbocharger.

The theory section covers different types of turbochargers and intercooling. Intercooling was introduced because it is essential for the stamina and efficiency of engines. The end of the theory section discusses research about the evolution of turbochargers in the 2000s. An example calculation for sizing a turbocharger was conducted in the empirical part of the study.

The main observation of this study was that the right sizing of a turbocharger is essential. An incorrectly sized turbocharger will not work as wanted and may even break the whole engine. Choosing the turbocharger is always a compromise but it is essential to stay in the best possible efficiency area at the compressor map and stay off the stall boundary.

### KEYWORDS:

Otto-cycle engine, charging, turbocharger, turbocharger evolution, turbocharger dimension

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>5</b>
<b>2 AHTAMISMENETELMÄT</b>	<b>6</b>
2.1 Pakokaasuahdin	6
2.2 Mekaaninen ahdin	8
2.3 Ruuviahdin	9
2.4 Paineaaltoahdin	9
2.5 Kaksivaiheahdin	11
<b>3 AHTOILMAN JÄÄHDYTYS</b>	<b>12</b>
<b>4 PAKOKAASUAHTIMEN KEHITYS 2000-LUVULLA</b>	<b>13</b>
4.1 Esimerkkejä ahtimista eri moottoreissa	14
4.1.1 Toyota 8NR-FTS	14
4.1.2 Ford ecoboost 2.3 L	15
4.1.3 Volkswagen 1,0 TSI CHZB	15
4.1.4 Opel B10XFT	16
4.1.5 Audi V8 TFSI CRDB	16
4.1.6 BMW Mini B38 A15	17
4.2 Muuttuvageometrinen ahdin	18
<b>5 PAKOKAASUAHTIMEN MITOITTAMINEN</b>	<b>20</b>
5.1 Painesuhde	21
5.2 Ilmavirta	21
5.3 Kompressorikartta	22
5.4 Turbiinikotelo	23
5.5 A/R Suhde	23
<b>6 ESIMERKKIMITOITUS</b>	<b>25</b>
6.1 Esimerkki liian pienestä ahtimesta	29
6.2 Esimerkki liian suuresta ahtimesta	30
<b>7 YHTEENVETO</b>	<b>31</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>32</b>

# 1 JOHDANTO

Ahdin on nykyaikaa, ja sitä käytetään nykyään lähes jokaisessa moottorissa, koska ahtimen avulla saadaan iskutilavuudet moottorissa pienennettyä, mikä taas pudottaa moottorin painoa. Polttoainekulutus pienenee myös ja päästöt saadaan matalammaksi.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia erilaisia ahtimia ja selvittää ahtimen mitoitusmenetelmää moottoriin. Laskelmien tavoitteena on selvittää, miten pakokaasuahdin mitoitetaan ja mitä asioita tulisi ottaa huomioon mitoituksessa.

Teoriaosassa käsitellään ensin pakokaasuahhtimen, mekaanisen ahtimen, painealtoahntamisen ja kaksivaihe ahtamisen toimintaperiaatteita. Sen jälkeen keskitytään pakokaasuahtimeen, sen kehitykseen 2000-luvulla ja pakokaasuahhtimen mitoittamiseen ottomoottoriin.

Lopuksi tässä työssä tehdään esimerkkilaskelma Nissan Skyline RB25DET

-moottorin ahtimelle. Auto käytetään tehopenkissä mitattavana ja verrataan laskelmia mitattuihin tuloksiin.

## 2 AHTAMISMENETELMÄT

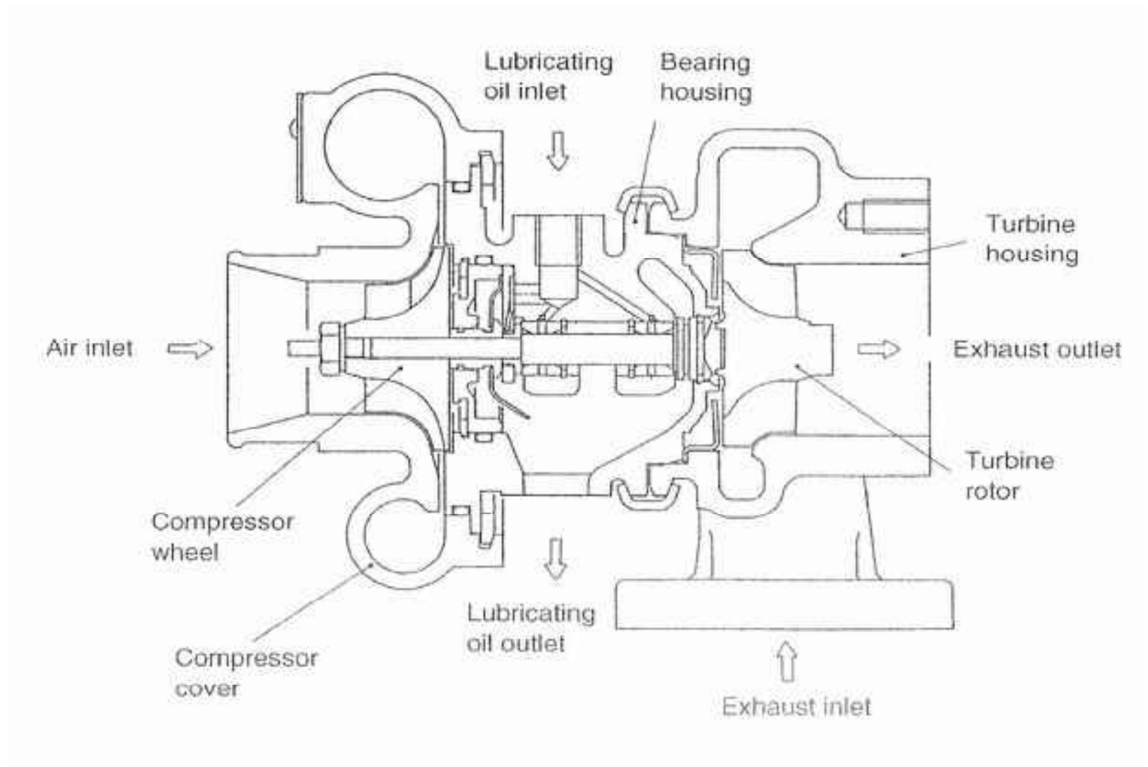
Sylinterin täytösaste vaikuttaa merkittävästi sylinteriin johtuvan ja siellä palavan polttoaineen määrään. Ahtamattomissa eli luonnollisella imulla toimivissa moottoreissa täytösaste on yleensä alle 1. Täytösastetta saa kasvatettua pakkosyöttämällä eli ahtamalla moottoria ylipaineella. Tällä tavalla moottorin tehoa ja hyötysuhdetta voidaan parantaa. (Juurikkala 1981, 322.)

### 2.1 Pakokaasuahdin

Pakokaasuahdin toimii kuten keskipakopumppu. Turbiinipyörä ja kompressoripyörä on liitetty toisiinsa akselin välityksellä, ja ne pyörivät yhtä nopeasti. (Juurikkala 1981, 431–435.). Pakokaasuvirtaus, joka menisi muuten hukkaan, hyödynnetään ahtimen käyttövoimana. Sen avulla pyöritetään turbiinipyörää, jolloin voima välittyy akselin kautta kompressoripyörälle. Kompressoripyörä pumppaa ilmaa kompressorikotelon läpi moottorille. Ilman pakkaantuessa sylinteriin ilmaa virtaa enemmän, ja samalla myös polttoainetta voidaan syöttää enemmän. Tällöin moottorin hyötysuhde paranee, ja siitä saadaan lisää tehoa verrattuna luonnollisella imulla toimivaan moottoriin. Turbiini- ja kompressoripyörän akseli on laakeroitu turboahtimen runkoon. Suurista pyörintänopeuksista johtuen laakerointi vaatii jatkuvasti hyvää voitelua. Laakeripesään tulee oma öljylinja, jonka kautta moottorin öljypumppu pumppaa jatkuvasti moottoriöljyä. Onkin erittäin tärkeää, että moottorissa on laadukasta öljyä ja että sitä on aina riittävästi. (GG Parts Import Oy 2015.)

Pakokaasuahtimen tuottamaa ahtopainetta säädetään yleensä hukkaportilla. Lähes jokaisessa pakokaasuahdetussa autossa on alkuperäisessä ahtimessa kiinteä hukkaportti kuvan 1 mukaisesti. Hukkaporttiin kuuluu ohjauskello, ohjaustanko ja hukkaportin läppä. Ohjauskellon sisällä on kalvo, jonka toiselle puolelle tulee letku. Kalvoa ja ohjaustankoa liikutetaan joko yli- tai alipaineella. Kun ahdin saavuttaa tavoiteahtopaineen, tanko kääntää hukkaportin läppää auki ja

pakokaasua pääsee virtaamaan turbiinipyörän ohi. Turbiinipyörän kautta menevä pakokaasuvirtaus ei näin ollen pääse kasvamaan ja ahtopaine pysyy vakiona.

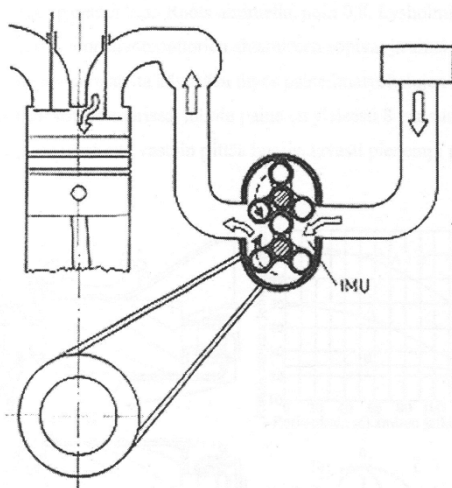


Kuva 1. Pakokaasuahdin. (Bell 1997, 23).

Viritysahtimissa käytetään paljon ulkoisia hukkaportteja. Toimintaperiaate on muuten sama kuin kiinteässä hukkaportissa, mutta ulkoinen hukkaportti tulee kiinni suoraan pakosarjaan. Ulkoisen hukkaportin suurimpia etuja on laaja valikoima, jonka ansiosta se on helpompi mitoittaa omaan käyttöön soveltuvaksi. Myös hukkaportittomia turbiinikoteloita on saatavilla useampia eri kokoja, toisin kuin hukkaportillisia. Lisäksi etuna on myös se, ettei turhia lämpökuormia johdeta ahtimelle. Ulkoisella hukkaportilla voidaan ohjata haitallisia virtauksia ja lämpökuormia jopa 50-prosenttisesti ahtimen ohi, kun kiinteällä vain noin 5–15-prosenttisesti. Kiinteä hukkaportti onkin tarkoitettu lähinnä ahtopaineen ohjaukseen ja on käytössä useimmissa vakioahtimissa. (Turbotekniikka Oy, 2015.)

## 2.2 Mekaaninen ahdin

Mekaanisessa ahtimessa voima välitetään kampiakselilta ahtimen hihnapyörälle esimerkiksi hihnan välityksellä. Yleisin käytetty mekaaninen ahdin on kiertomäntäpumppu eli niin sanottu Roots-ahdin. Siinä on kaksi roottoria, joissa kummasakin on 2–3 siipeä tai uloketta, jotka pyörivät toistensa lomassa ja pumpaavat ilmaa moottorille. Roottorien siivet eivät ota toisiinsa kiinni, minkä vuoksi Roots-ahdin ei tarvitse erillistä voitelua. Kaksisiipinen ahdin aiheuttaa voimakkaampia sysäyksiä paineistettuun seokseen kolmisiipiseen verrattuna, minkä takia kolmisiipinen on yleisempi vaihtoehto. Paras toimintanopeus on noin 9000–10 000 kierrosta per minuutti. Osakuormitusalueella ahdin on epäedullinen, koska se pumpkaa moottorin tarpeeseen nähden liikaa ilmaa, minkä vuoksi hyötysuhde laskee. Kuvassa 2 on esitetty Roots-ahdin. (Juurikkala 1981, 430–431.)



Kuva 2. Roots-ahdin (Juurikkala 1981, 431.)

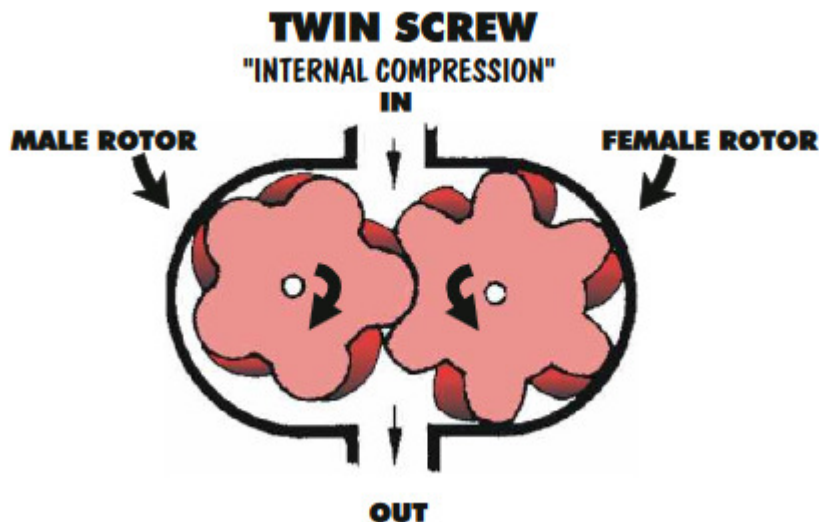
Myös keskipakopumppua voidaan käyttää mekaanisena ahtimena. Sillä on huono tuotto pienillä käyntinopeuksilla, joten moottori kiihtyy hitaasti. Keskipakoahdin vaatii suuren pyörimisnopeuden, noin 20 000–30 000 kierrosta per minuutti, jolloin sen tuottama ylipaine jää vain 0,3 baariin. Tämän vuoksi sitä käytetään yleensä kaksivaiheisena ahtimena, jos halutaan tuottaa suurempi ylipai-



ne. Suurin etu keskipakoahtimelle on sen halpa tuotantokustannus yksinkertaisen rakenteensa vuoksi. (Juurikkala 1981, 431.)

### 2.3 Ruuviahdin

Lysholm Twin-Screw, eli ruuviahdin on nykyaikaisempi mekaaninen ahdin. Ruuviahdinta on kuitenkin käytetty merkittävästi vähemmän kuin Roots-ahdinta. Ahtimen sisällä on kaksi nimensä mukaista ruuvin muotoista roottoria. Roottorit pyörivät limittäin ja ovat säteittäin symmetrisiä, mutta sivusuunnassa epäsymmetrisiä, aiheuttaen siten ilman puristumisen kasaan ja ylipaineen. (Kenne Bell, 2016.)



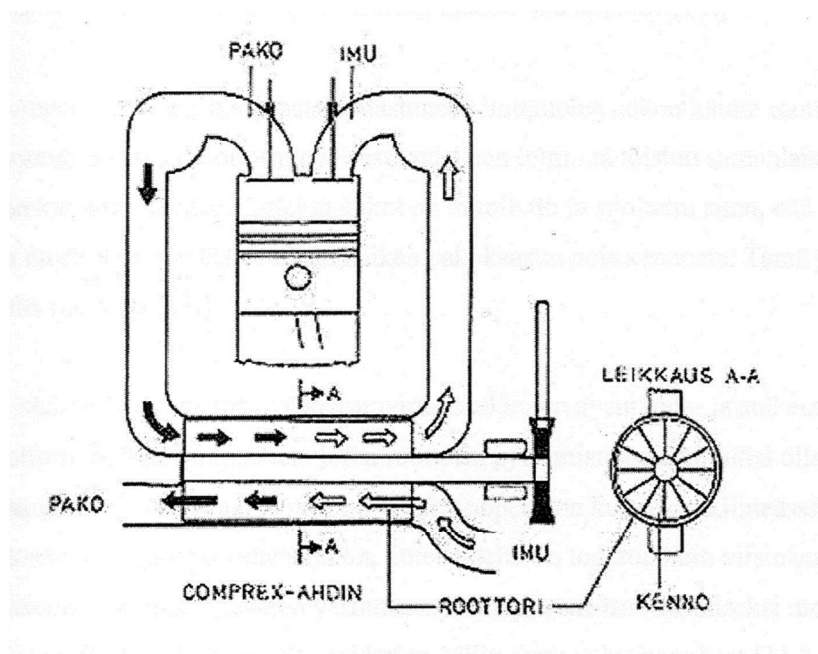
Kuva 3. Ruuviahdin (Kenne Bell, 2016)

### 2.4 Paineaaltoahdin

Paineaaltoahdinta kutsutaan myös Comprex-ahtimeksi. Se ei ole ahdin sanan varsinaisessa merkityksessä, koska sen toiminta perustuu osaksi putkistossa tapahtuvaan painevärähtelyyn. Comprex-ahtimen sisällä oleva roottori on jaettu seinämien avulla useaksi kennoksi, ja sitä ympäröi kotelo, jossa on neljä aukkoa kummassakin päädyssä. Roottori saa voimansa mekaanisten kitkojen voit-

tamiseksi kampiakselilta hihnan välityksellä. Sen tarvitsema teho on moottorin hyötytehosta vain noin 1 %. (Juurikkala 1981, 429)

Comprex-ahdin toimii pakokaasuvirtauksen tullessa roottorin toisesta päästä kennoon puristaen kennossa jo olevan ilma-polttoaineseoksen kokoon työntäen sen samalla kotelon vastapäisistä aukosta. Kennoon virtaava pakokaasu saa aikaan paineaallon, joka etenee jopa yli äänen nopeutta. Roottorin pyörintänopeus pitää ajoittaa niin, että jokainen kenno on vuorollaan menoaukon kohdalla, kun paineaalto saavuttaa kennon päädyn. Kenno on mitoitettu niin, että roottorin pyöriessä uusi ilma-polttoaineseos täyttää koko kennon, jäähdyttää sen ja pakokaasu virtaa samalla ulos. (Juurikkala 1981, 429–430.)



Kuva 4. Comprex-ahdin (Juurikkala 1981, 429)

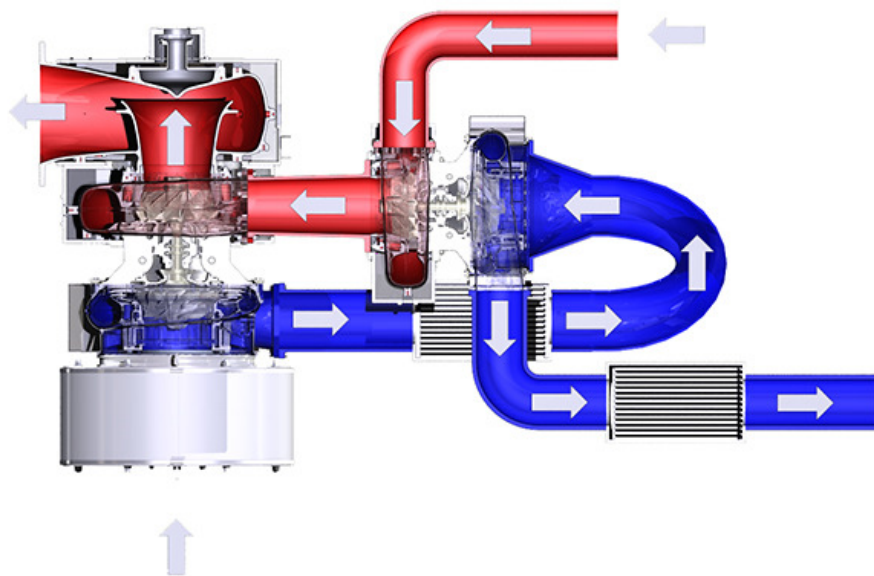
Comprex-ahdin on kallis valmistaa ja nykyahtimiin verrattuna epäedullinen hyötysuhde. Comprex-ahdin toimii ilmaylijäämällä ja on siksi sopiva dieselmootto-reihin, joissa pieni pakokaasujen sekoittuminen imuilmaan ei tuo merkittävää haittaa toisin kuin ottomootto-reissa, joissa ahtimen roottorin pyörintänopeutta

joudutaan ohjaamaan tarkemmin. Kyseistä ahdinta ei ole ikinä sarjatuotettu otomootoreihin. (Swissauto WENKO AG, 2015.)

## 2.5 Kaksivaiheahdin

Kaksivaihe ahtamisen nimitys tulee kahden ahtimen sarjaan kytkemisestä. Yleinen perinteinen tapa on ollut kytkeä pienempi ahdin ensiksi pakosarjaan ja pienemmältä ahtimelta isompaan ahtimeen. Myös kompressoripuoli on sarjaan kytkettynä, niin että isomman ahtimen ahtoputki menee pienemmän ahtimen sisäänotto aukkoon. Tällöin kaikki ilma kiertää molempien ahtimien kautta niin turbiini- kuin kompressoripuolellakin.

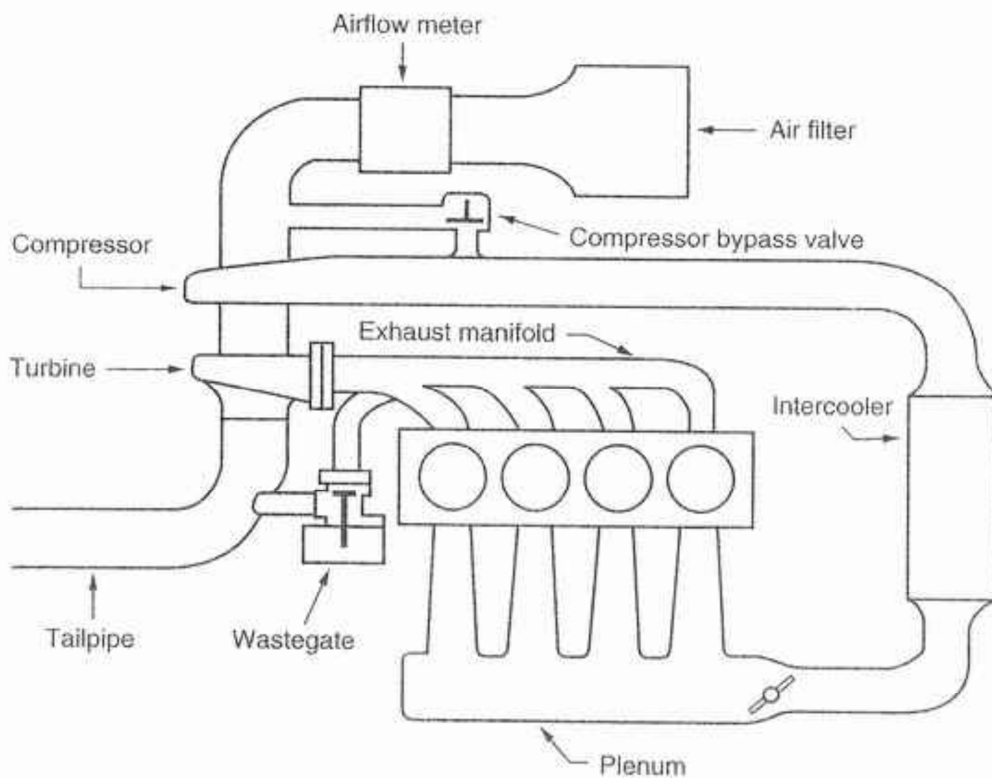
Kahden ahtimen suurimpia etuuksia on, että saadaan pienemmällä ahtimella vääntöä pienemmillä kierroksilla ja isommalla ahtimella isommille kierroksille. Investointikustannukset ovat kalliimmat, kun on kaksi ahdinta ja ahtimien ohjaus tuo haasteellisuutta. Lisäksi kaksi ahdinta vaatii enemmän tilaa, mitä ei nykyautoissa ole yleensä paljoa. Tämän tyyppinen ahtamisen menetelmä on ollut suosittu dieselmoottorissa. (Hiereth, Prenninger 2010, 105–106.)



Kuva 5. Kaksoisahtaminen. (MAN Diesel & Turbo SE.)

### 3 AHTOILMAN JÄÄHDYTYS

Ilman pakkaaminen ahtamalla nostaa sylinteriin virtaavan ilman lämpötilaa reilusti. Ilman tilavuus laajenee lämmitessään ja samassa määrässä ilmaa on silloin vähemmän happea. Hyötysuhteen parantamiseksi ahdettu ilma pitäisi saada jäähtymään. Tähän selkeästi yleisin tapa on ulkoilmalla jäähdytettävä ahtoilman jäähdytin, eli niin sanottu välijäähdytin. Välijäähdytin sijoitetaan esimerkiksi auton keulalle niin, että ajoviima pääsee virtaamaan jäähdyttimen läpi siirtäen lämpöä pois ahdetusta ilmasta. Sijoittamisessa huomioitavaa on ahtoputkien pituus, mitä pidemmät putket, sitä pidemmäksi moottorin kaasuun vastavuus kasvaa. Ahdettu ilma on myös tarpeellista jäähdyttää moottorin kestävyyskannalta. Liian kuuma sylinteriin virtaava ilma voi aiheuttaa polttoaineseoksen hallitsemattoman itsestään syttymisen, joka voi pahimmassa tapauksessa rikkoa koko moottorin. Kyseistä ilmiötä kutsutaan nakuttamiseksi. (Bell 1997, 47–50.)



Kuva 6. Ahtoilman jäähdytys. (Bell 1997, 47.)

## 4 PAKOKAASUAHTIMEN KEHITYS 2000-LUVULLA

Turboahtimien suunnittelu on siirtynyt nykyään aina yhdessä moottorivalmistajan kanssa. Moottorivalmistaja kertoo tarpeensa ja ahdinvalmistaja alkaa suunnitella yksilöityä ahdinta kyseiselle moottorille. Suunnittelukriteerinä on, että ahdin kestää moottorin koko elinkaaren. Ennen moottorin olemassaoloa ajetaan jo ensimmäisiä testejä ahtimelle pelkällä polttimen tuottamalla kuumalla kaasulla. (Räsänen, Suomen autolehti 3/2014, 55.)

Ahtimien kehitysvauhti on nopeutunut merkittävästi 1990-luvun jälkeen. Esimerkiksi vuonna 1995 ahtimen kehitys valmiiksi ahtimeksi kesti viisi vuotta. Nykyään valmistus kestää noin kaksi vuotta ja ahdin on tuotantovalmis. Koko suunnitteluprosessi on monimutkainen, koska ahdin on osana muun muassa voitelu-, jäähdytysjärjestelmässä ja moottorinohjauksessa. Samalla ahdinvalmistajan täytyy tehdä turvallisuustestejä ahtimelle. Jos esimerkiksi turbiinikotelo halkeaa, pääsee kuumia kaasuja moottoritilaan, mistä seuraa palovaara, ja näin ei saa tapahtua. Jos ahdinta testatessa havaitaan turvallisuusriski, pitää ahtimen rakennetta muuttaa. Tämän vuoksi moottorivalmistajan ja ahdinvalmistajan yhteistyö on erittäin tärkeä, että tiedetään tarkka ahtimen sijoitus moottoritilassa ja ympäröivät olosuhteet. Kompressori- ja turbiinikotelon on myös kestettävä ahtimen hajoaminen niin, ettei mahdollisesti irtoavia sirpaleita pääse lentämään ympäristöön tai rikkomaan moottoria. (Räsänen, Suomen autolehti 3/2014, 55.)

Tuotekehitysvaiheessa yleensä testaus keskittyy tarkastelemaan ahtimen toimimista ja että se toimii kuten on suunniteltu. Kun ahdin toimii suunnitellusti, seuraava testivaihe on kestotestityyppinen. Testissä erilaisia olosuhteita simuloidaan ja nykyään niitä ajetaan automatisoidusti ympäri vuorokauden, mikä on osasyynä kehitysajan lyhentymiseen. (Räsänen, Suomen autolehti 3/2014, 55.)

Ahtimia valmistetaan mikronien tarkkuudella. Akselin tulee olla suurien pyörin-  
tänopeuksien, jopa 150 000 kierrosta minuutissa, johdosta todella hyvin tasa-  
painotettu. Pienikin heitto saa akselin värähtelemään, mikä tuhoaa ahtimen.  
Valmistusvaiheessa siipipyörät tasapainotetaan erikseen irtonaisina. Lopullinen  
tasapainotus tehdään kootulle ahtimen ytimelle ja sitä testataan puoli- ja täys-  
nopeudella. (Räsänen, Suomen autolehti 3/2014, 55.)

#### 4.1 Esimerkkejä ahtimista eri moottoreissa

Ahtimet on täysin yksilöityjä jokaiselle moottorille. Materiaalit, ahtimen koko,  
hukkaportin ohjaustavat ja kaikki suunnitellaan tarpeen mukaan. Tässä työssä  
esitellään esimerkkejä eri autovalmistajien ahtimista.

##### 4.1.1 Toyota 8NR-FTS

Tätä nelisynteristä moottoria käytetään esimerkiksi Toyota Auriksessa, ja siinä  
on käytössä IHI:n (Ishikawajima-Harima Heavy Industries) valmistama ahdin.  
Ahtimen keskiö on vesijäähdytetty ja turbiinikotelo on yksikanavinen ja aktiivisel-  
la hukkaportilla varustettu. Hukkaporttia voidaan ohjata ilman nimellisahto-  
painettakin. Kuormituksen ollessa matala hukkaporttia avaamalla saadaan pa-  
kokaasujen vastapainetta matalammaksi, eli moottorin hyötysuhteelle haitalli-  
nen pumppaushäviö pienenee. Hukkaportti voidaan myös avata heti kylmä-  
käynnistyksen jälkeen, jolloin kuumat pakokaasuvirtaukset pääsevät vapaam-  
min katalysaattorille lämmittämään sen käyttölämpötilaan. Näin vähennetään  
kylmäkäynnistyksen yhteydessä syntyviä päästöjä. Ahtimen pyörivät massat on  
pyrity pitämään mahdollisimman matalina. Moottori tuottaa 114 hevosvoimaa  
tehoa ja 190 Newton-metriä vääntöä. (Kiiskinen, Suomen autolehti 7/2015, 94.)

Paine- ja lämpötilahäviöiden minimoimiseksi ahdin on kiinnitetty suoraan pa-  
kosarjaan mahdollisimman lähelle sylintereitä. Välijäähdytys on toteutettu neste-  
täytteisellä jäähdyttimellä, ja se on sijoitettu moottorin päälle. Näin on ahtoput-

ket saatu lyhyemmiksi, mikä lyhentää moottorin viivettä etenkin nopeissa kuorimitustilanteissa. (Kiiskinen, Suomen autolehti 7/2015, 94.)

#### 4.1.2 Ford ecoboost 2.3 L

Tässä moottorissa Ford käyttää ensi kertaa kaksikanavaista *twin scroll* -turboahdinta. Ahdin on Honeywellin valmistama. Kaksikanavainen ahdin käyttää hyväkseen sylinteriparien pakokaasupulsseja, jotka johdetaan eroteltuna ahtimen turbiinipyörälle. Sylinteriparien erottaminen vähentää pakokaasujen sykkimistä takaisin sylinteriin päin ja parantaa näin ahtimen hyötysuhdetta. Ahtimen keskiö on nestejäähdytteinen, ja hukkaporttia ohjataan sähköpneumaattisesti. Pyörivien osien massanhitaus on vähäinen. Kevyen rakenteensa ansiosta ahdin reagoi nopeasti vähäisiinkin pakokaasuvirtauksiin. Suurin tehollinen sylinterikeskipaine saadaan näin esille alemmilla pyörintänopeuksilla. Välijäähdytys on sijoitettu auton keulalle ja toimii ajoviimalla. Moottori on käytössä esimerkiksi Ford Focus RS:ssä. Tehoa tämä moottori tuottaa valmistajan mukaan 350 hevosvoimaa ja vääntöä 475 Newton-metriä. (Kiiskinen, Suomen autolehti 6/2015, 67–68.)

#### 4.1.3 Volkswagen 1,0 TSI CHZB

Valmistaja on turboahdinta valittaessa asettanut kriteeriksi, että korkea sylinterikeskipaine saavutetaan matalilla moottorin pyörintänopeuksilla. Vaatimukseen kuului myös, että keskialueen pyörintänopeuksien tehosta ei saisi tinkiä, pyörivien osien massanhitaus tulisi olla alhainen ja ahtimen fyysinen koko pieni. Ahtimeksi valikoitui yksikanavainen hyvin lähelle sylintereitä sijoitettu sähkökäyttöisellä hukkaportilla varustettu ahdin. Turbiinikotelo on valmistettu austeniittisesta valuteräksestä ja turbiinipyörä MAR246-nikkelimetalliseoksesta. Komponentit on mitoitettu kestämään 1050 °C:n lämpötiloja. Pakosarja on nestejäähdytteinen, jonka tarkoituksena on alentaa pakokaasujen lämpötilaa. Moottori on käytössä Volkswagen Polossa. Se on rivi kolmisylinterinen ja tuottaa 110 hevosvoimaa ja 200 Newton-metriä. (Kiiskinen, Suomen autolehti 3/2015, 69.)

Sähköisellä askelmoottorilla varustettu hukkaportti mahdollistaa täysin ahtopaineesta riippumattoman ohjauksen hukkaportille. Osakuormitusalueella moottorinohjaus avaa hukkaporttia ja osa pakokaasuista pääsee virtaamaan vapaasti turbiinipyörän ohi vähentäen moottorin pumppaushäviötä. Välijäähdytys on toteutettu nestetäytteisellä jäähdyttimellä, ja se on ahtoputkien lyhentämiseksi sijoitettu suoraan imusarjaan. (Kiiskinen, Suomen autolehti 3/2015, 69.)

#### 4.1.4 Opel B10XFT

Opelin uuden sukupolven kolmisylinterinen moottori on käytössä esimerkiksi Opel Corsassa ja Adamissa. Siinä on tehoa 115 hevosvoimaa ja vääntöä 170 Newton-metriä. Moottorissa käytetään MHI:n (Mitsubishi Heavy Industries) valmistamaa ahdinta. Ahdin on teräsrunkoinen, yksikanavinen ja fyysiseltä kooltaan pieni. Hukkaportti on pneumaattisesti ohjauttava. Pyöriviä massoja on pyritty saamaan mahdollisimman pieniksi, että moottori reagointinopeus olisi mahdollisimman pieni ja suurin sylinterinkeskipaine saavutetaan matalilla pyörintänopeuksilla. Turbiinipyörä on valmistettu Inconel (nikkeli-kromi-ferriittimangaani) -metalliseoksesta ja sen halkaisija on vain 35 mm ja kompressoripyörän halkaisija on 40 mm. Sekä ahdin että pakosarja on nestejäähdytteisiä, näin saadaan pidettyä lämpötilat matalina. (Kiiskinen, Suomen autolehti 10/2014 72–73.)

#### 4.1.5 Audi V8 TFSI CRDB

Moottori on varustettu kahdella ahtimella, joiden kompressoripesät ovat nestejäähdytteiset. Sylintereitä on kahdeksan, ja ne on asetettu V-muotoon. Audi on ottanut tässä moottorissa ensi kertaa käyttöön kaksikanavaiset ahtimet. Hukkaporttien ohjaus on toteutettu sähköpneumaattisesti. Polttoaineen palamista on tehostettu sähkökäyttöisillä läppäventtiileillä imuputkistossa, joiden tehtävä on saada ahdettu ilma pyörteilemään. Ahtimien sijoitus ahtaassa moottoritilassa on ollut hankalaa ja tuonut ahtimervalmistajalle omat haasteensa saada lämpökuormat pois konetilasta ja ahtimet kestäämään suuria lämpötiloja. Turbiinipesät

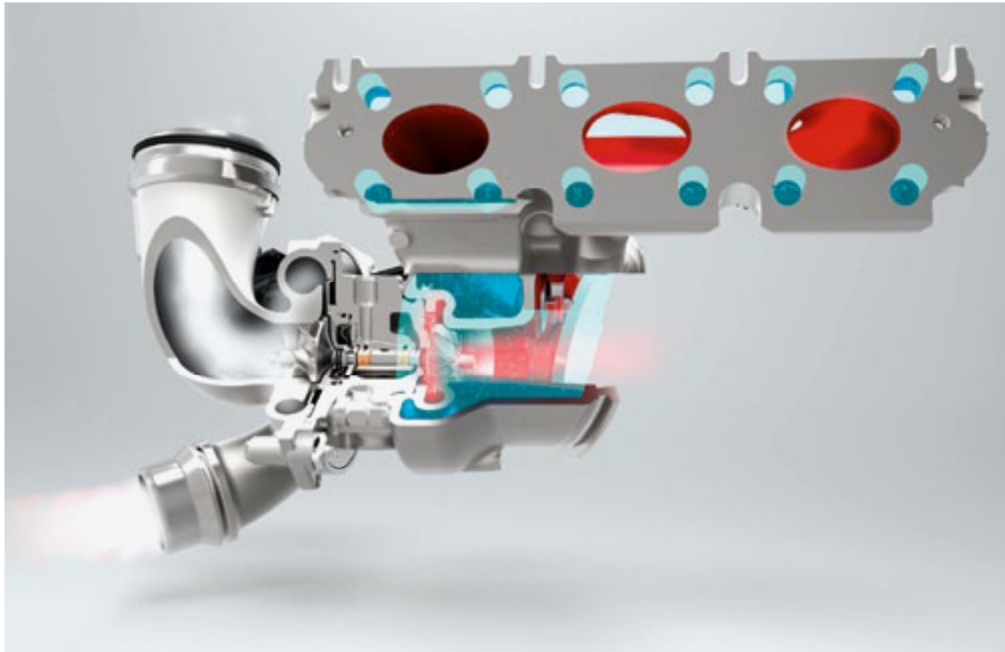


on valmistettu 1.4849-valuteräksestä. Pakosarjojen ja ahtimien on muotoiltu niin, että termomekaaninen kuormitus jää alhaiseksi. Pakosarjojen rakenne on kaksoisvaippainen, mikä eristää johtuvaa lämpötilaa hyvin. Niiden sisäputket ja suojavaipat on valmistettu kuumuutta kestävästä Inconel-metalliseoksesta. Molemmat ahtimet ahtavat omaa sylinteririviä. Välijäähdytyksestä vastaa nestetäytteen jähdyt-in. Moottoria käytetään esimerkiksi Audi RS7 mallissa ja se tuottaa 579 hevosvoimaa tehoa ja 700 Newton-metriä vääntöä. (Kiiskinen, Suomen autolehti 2/2014, 60–61.)

#### 4.1.6 BMW Mini B38 A15

Moottorissa käytetään Continentalin valmistamaa yksikanavista pakokaasuahdinta. Ahdin on yleisesti käytetyn seostetun teräksen sijasta valmistettu alumiinista turbiinipesä mukaan lukien. Ahtimesta tuli näin 1,2 kg, eli noin 30 % kevyempi teräksiseen verrattuna. Ottomoottorista syntyy hyvin kuumia, lähes 1000 °C:n pakokaasuja. Alumiininen turbiinipesä ei kestäisi ilman kunnollista jäähdytystä vaurioitumatta niin korkeita lämpötiloja. Ahtimen turbiinipesä ja pakosarja on molemmat nestejäähdytteisiä vaurioiden välttämiseksi. Ahtimen sisävaipassa lämpötila voi nousta 350 °C:seen, mutta ulkovaipassa vain 130 °C:seen (MTZ 11/2014, 30-33)

Jäähdytyksen vuoksi pakokaasujen lämpötila jää korkeimmillaan 850 °C:seen. Polttoainetta ei tarvitse täyskuormituksella rikastaa yhtä paljoa ahtimen jäähdyttämiseksi. Polttoaineenkulutus, sekä päästöt saadaan näin pieneen määrään. Alumiinista valmistettu ahdin on esitetty kuvassa 7. (MTZ 11/2014, 30–33.)



Kuva 7. Alumiinista valmistettu ahdin. (MTZ 11/2014, 32.)

#### 4.2 Muuttuvageometrinen ahdin

Yksi näkyvimpiä kehityksiä pakokaasuahtimissa on muuttuvageometrinen turboahdin, eli niin sanottu VNT (variable nozzle turbine) tai VTG (variable turbine geometry). (Turbotekniikka 2015)

Muuttuvageometrisessa turbiinissa on liikkuvat siivekkeet turbiinipyörässä, jotka ovat ”lepoasennossa” pienessä kulmassa. Pienillä kuormilla ajettaessa turbo vastaa nopeammin kaasuun ja saa nostettua ahtopaineen ylös alhaisilla kierroksilla. Siipien ollessa näin pienessä kulmassa nousisi pakopaineet suuriksi ja moottorin pumppaushäviö kasvaisi reilusti, mutta muuttuvageometrisessa ahtimessa siivekkeet avautuu ja pakokaasu pääsee virtaamaan vapaammin. Näin riittää tehoa myös ylemmille kierroksille. (Turbotekniikka 2015)

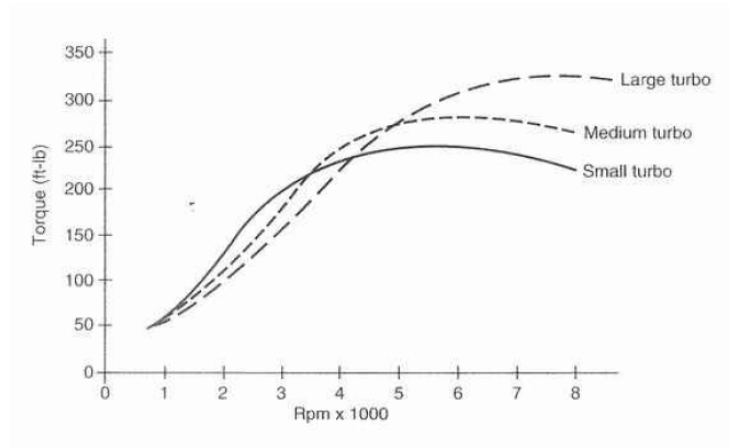
Aluksi siivekkeiden ohjausta hoidettiin yksinkertaisella kalvopainerasiolla, lähi-vuosina ahtimet ovat kehittyneet reilusti. On tullut eri valmistajilta erilaisia hyvin-kin tarkkoja ohjausjärjestelmiä. Esimerkiksi SREA (Simply Rotatory Electronic

Actuator) ja REA (Rotatory Electronic Actuator). Näiden avulla päästöt ovat pudonneet ja ahtimista on tullut todella tehokkaita ja nopeasti reagoivia. (Turbotekniikka 2015)

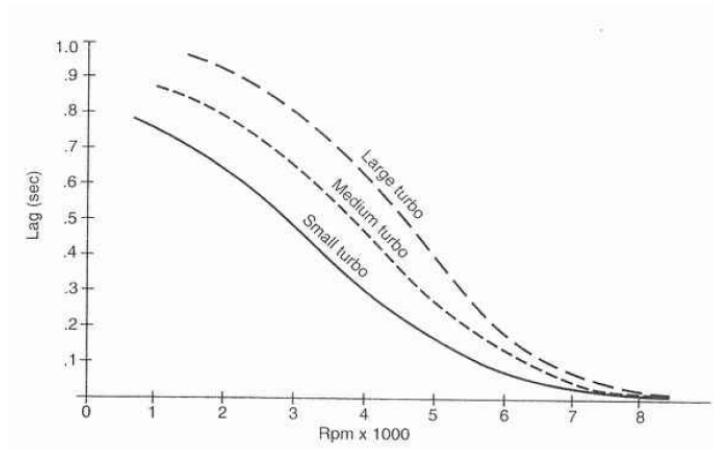
Muuttuvageometrisia ahtimia ei yleensä käytetä ottomoottoreissa, koska ilmeisesti niiden dieseliä korkeampien pakokaasun lämpötilojen vuoksi, mikä voi olla vahingollista herkälle ahtimelle.

## 5 PAKOKAASUAHTIMEN MITOITTAMINEN

Ahtimen oikea mitoittaminen on tärkeää, koska väärin mitoitettu ahdin voi pahimmassa tapauksessa rikkoa moottorin. Ei ole olemassa yhtä oikeata vaihtoehtoa mitoittamiseen. Etukäteen pitää tietää, millaista käyttäytymistä ahtimelta haluaa. Karkeasti voidaan jakaa pakokaasuahdin niin, että mitä isompi ahdin, sitä isompi teho, mutta myös turboviive kasvaa, kun tarvitaan suurempi pakokaasuvirtaus paineen kehittymiseen ja pyörivät massat on yleensä myös suurempia. Toisaalta myös mitä pienempi ahdin, sitä pienemmäksi viive tulee, mutta silloin myös huipputehot jäävät matalammaksi, kun pakopaine kasvaa liian suureksi liian pienen turbiinipesän vuoksi. Ahtimen valinta on aina kompromissi. Kuvissa 8 ja 9 on esitetty sama diagrammissa. (Bell 1997, 9–11.)



Kuva 8. Moottorin rajavääntömomentti erikokoisilla ahtimilla (Bell 1997, 10)



Kuva 9. Turbon viive erikokoisilla ahtimilla (Bell 1997, 11)

Ahdinvalmistajilta on vaikea saada SI-järjestelmään sopivia painekarttoja. Tämän vuoksi seuraavat esimerkit lasketaan Yhdysvaltojen yksiköiden mukaisesti, jotta ahdinvalmistajien karttoja voidaan käyttää hyväksi.

### 5.1 Painesuhde

Painesuhde (PR) saadaan laskemalla ahtimen tuottama kokonaispaine jaettuna ilmakehän paineella. Ahdinta mitoitettaessa käytetään ilmakehänpaineena likiarvoa 14.7 psi. (Bell 1997, 26)

$$PR = \frac{p_1 + p_2}{p_1}$$

$p_1$  = ulkoilman paine

$p_2$  = ahtopaine

### 5.2 Ilmavirta

Ilmavirta (AR) saadaan laskemalla ensin ahtamattoman moottorin perusilmavirta ja kertomalla se painesuhteella:

$$AR = \frac{cid * rpm * 0,5 * Ev}{25043} * PR$$

$E_v$  = Volymetrinen hyötysuhde (n. 85 %)

$c_{id}$  = Moottorin iskutilavuus (kuutiotuumana)

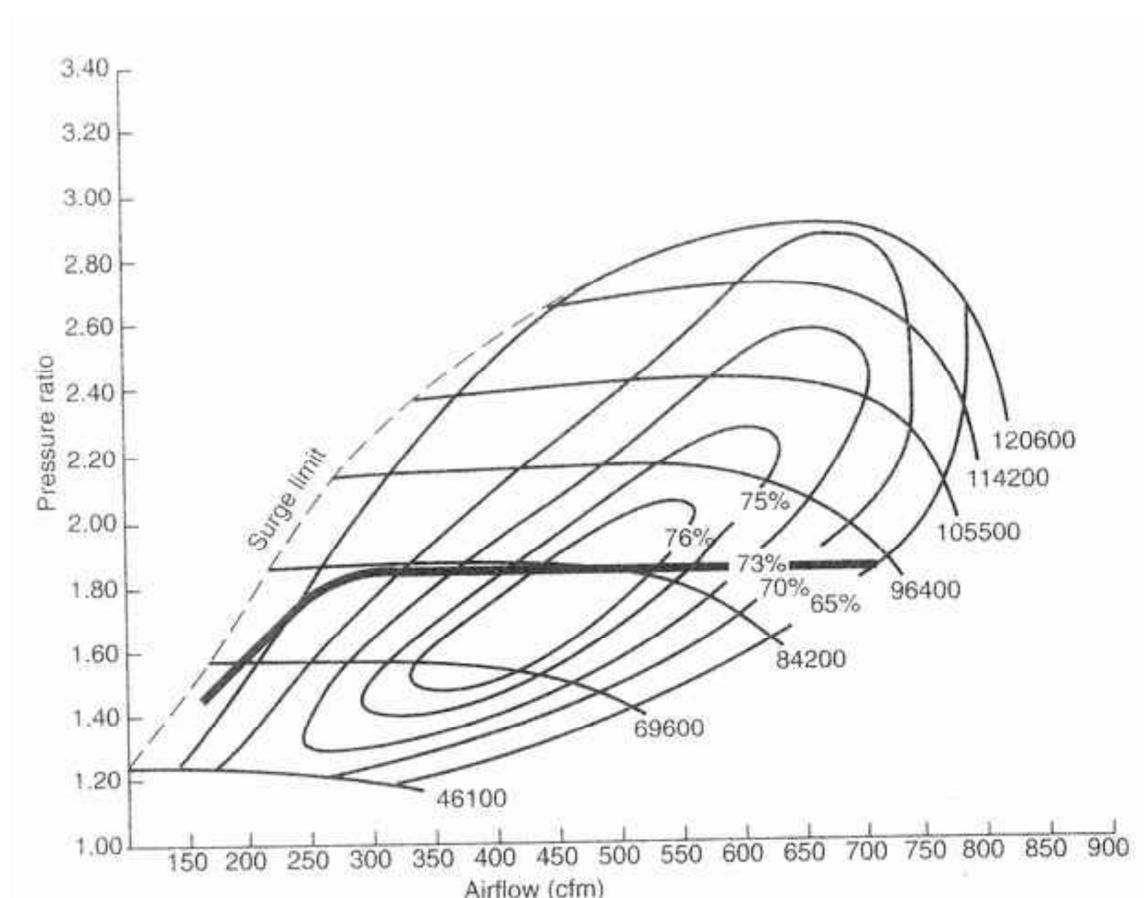
rpm = Moottorin pyörintänopeus

PR = Painesuhde

(Bell 1997, 27-28)

### 5.3 Kompessorikartta

Kun painesuhde ja ilmavirta on saatu selville, ne sijoitetaan valitun ahtimen kompressorikarttaan.



Kuva 10. Kompessorikartta (Bell 1997, 30)

Kuvassa 10 on y-akselilla painesuhde ja x-akselilla ilmavirta. Kuvion vasemmassa reunassa esitetty sakkausraja mitä ei saa ylittää. Sakkaus vähentää ahtimen hyötysuhdetta reilusti ja pahimmassa tapauksessa rikkoo koko ahtimen. Keskialueella on kuvattu ahtimen hyötysuhdetta prosenteilla ja oikeassa reunassa on ahtimen pyörintänopeus. Kuvan esimerkkilaskelmassa on saatu tulokseksi painesuhde 1,80 ja se on piirrettynä kompressorikarttaan. (Bell 1997, 28-30)

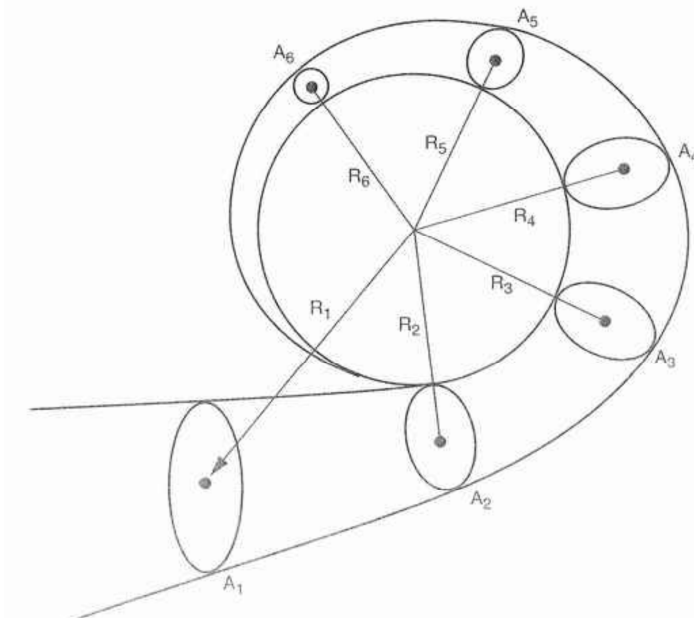
#### 5.4 Turbiinikotelo

Turbiinikotelon mitoittamista ei pidä unohtaa, sillä väärän kotelon valinta voi pilata kokonaan ahtimen toiminnan. Yleisimmin voidaan sanoa, että mitä pienempi turbiini, sitä pienempi turboviive. Ahdin herää alemmalla moottorin pyörintänopeudella, mutta virtaus taas kärsii yläkierroksilla ja vastaavasti toisinpäin. Eli mitä isompi turbiinikotelo, sitä enemmän ahtimesta saa tehoa irti, mutta samalla turboviive kasvaa, kuten kuvassa 8 esitetään. (Bell 1997, 31-35)

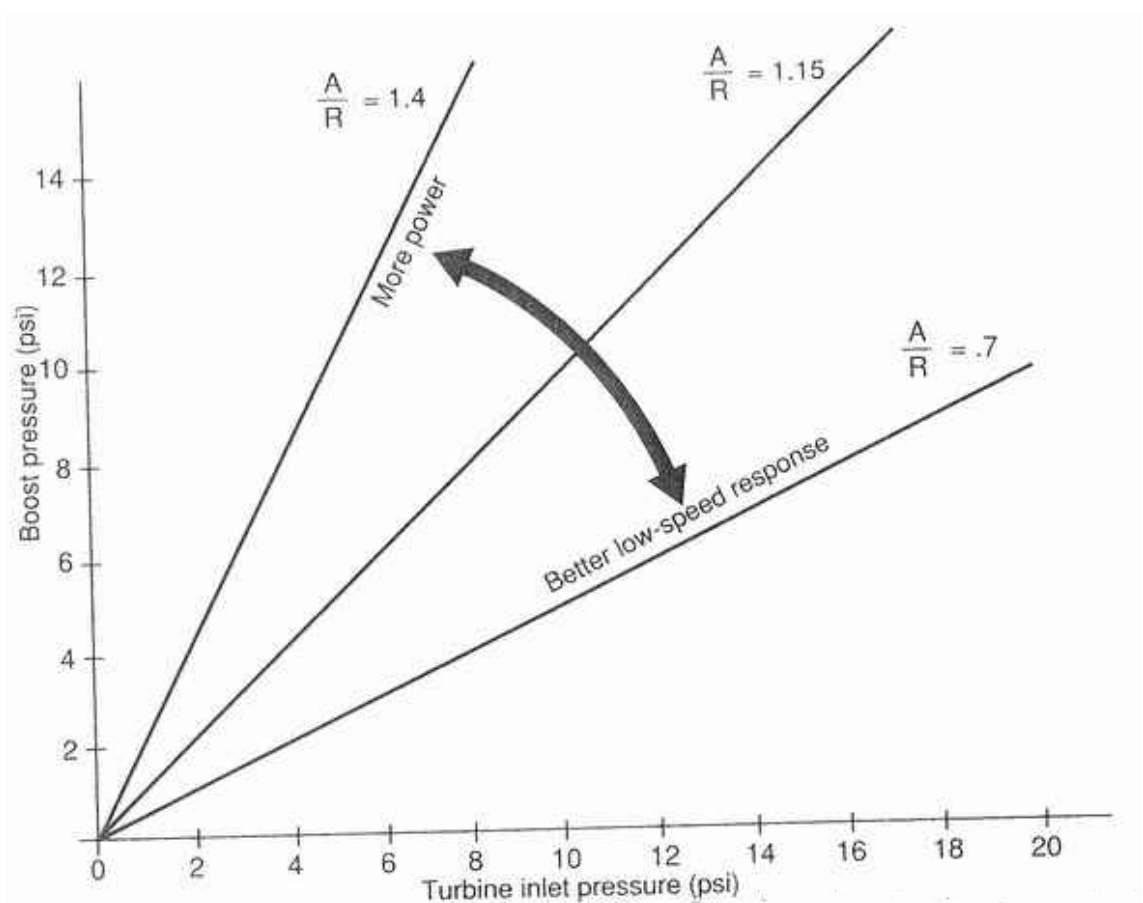
#### 5.5 A/R Suhde

Kirjaimet A/R tulevat englannin kielestä sanoista area ja radius. Arealla tarkoitetaan turbiinikotelon tuloaukon pinta-alaa ja radiuksella pakosiiven ja turbiinikotelon tuloaukon keskipisteen etäisyyttä. A/R suhde pysyy kokoajan vakiona. (Bell 1997, 31-33)

$$\frac{A1}{R1} = \frac{A2}{R2} = \frac{A3}{R3} = \frac{A4}{R4} = \frac{A5}{R5} = \frac{A6}{R6}$$



Kuva 11. Turbiinikotelon A/R suhde. (Bell 1997, 32)



Kuva 12. A/R vaikutus ahtimeen. (Bell 1997, 34)



## 6 ESIMERKKIMITOITUS

Esimerkkimitoituksessa toimiva Nissan Skyline on varustettu 2,5-litraisella (153 cid) RB25DET-moottorilla. Ahtimeksi on valittu Holset HX35 #12, ja seuraavassa laskuesimerkissä tarkistetaan, soveltuuko kyseinen ahdin tälle kokoonpanolle. Tavoite suhteellinen ahtopaine on 1,5bar.

Ensiksi lasketaan aikaisemman esimerkin mukaisesti painesuhde:

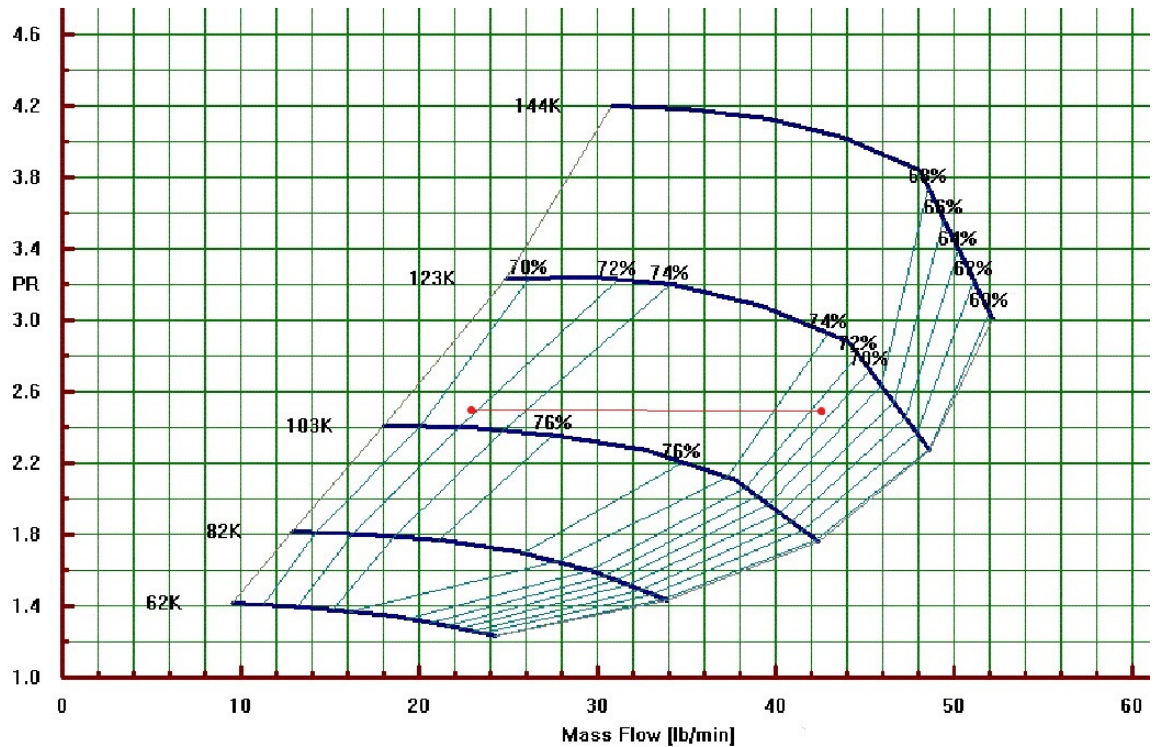
$$PR = \frac{1bar + 1,5bar}{1bar} = 2,5$$

Seuraavaksi lasketaan perusmoottorin ilmavirta 6500 rpm:n kohdalla ja kerrotaan se painesuhteella:

$$AR = \frac{153cid * 6500rpm * 0,5 * 0,85\%}{25043} * 2,5 = 42,2 lb/min$$

Ahtimen koon perusteella arvioidaan, että ahdin saavuttaa täyden 1,5bar ahtopaineen 3500 rpm kohdalla. Tämän perusteella tarkistetaan, ettei sakkausrajaa saavuteta:

$$AR = \frac{153cid * 3500rpm * 0,5 * 0,85\%}{25043} * 2,5 = 22,71 lb/min$$



Kuva 13. Holset HX35 kompressorikartta. Karttaan on sijoitettu punaisella las-  
kujen tulokset.

Kuvassa 13 kompressorikarttaan on sijoitettu saatujen laskujen tulokset. Komp-  
ressorikartasta voidaan todeta, että ahdin soveltuu 1,5 baarin ahtopaineella hy-  
vin tälle autolle. Tällöin pysytään vielä kaukana sakkausrajasta ja viiva osuu  
kohtuullisen keskelle karttaa.

Tiedettävästi turbo bensiinimoottoreista on saatu tehoa pienimmillään 0,052  
bhp/cid psi ja enimmillään 0,077 bhp/cid psi seuraavalla laskukaavalla

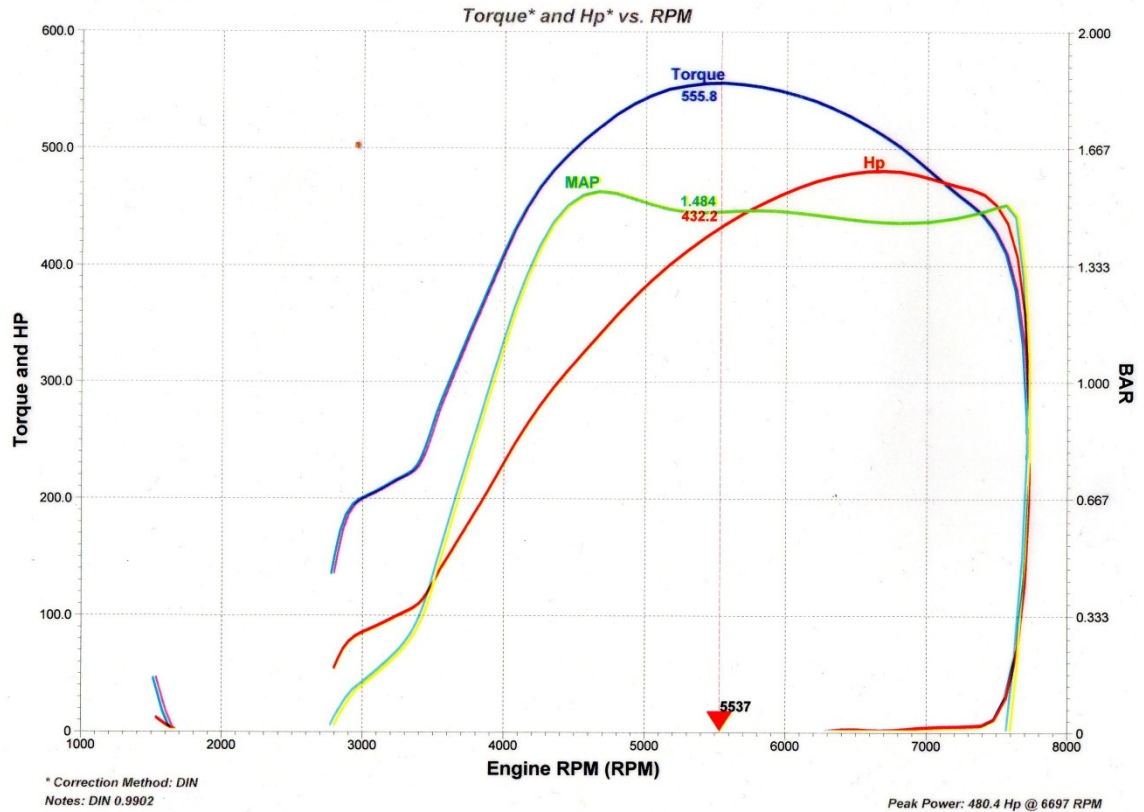
$$0,052 * 153cid * (22,05psi + 14,7psi) = 292 \text{ bhp}$$

$$0,077 * 153cid * (22,05psi + 14,7psi) = 433 \text{ bhp}$$

(Bell 1997, 12)

Voidaan siis todeta, että tällä painesuhteella pitäisi saada tästä moottorista mi-  
tattua tehoa 292-433 bhp.

Seuraavaksi auto käytettiin Pirkkalassa Tatechilla tehonmittauksessa.



Kuva 14. Tehonmittauspöytäkirja. Teho on ilmoitettu hevosvoimina, vääntö Newton-metreinä ja paine baareina

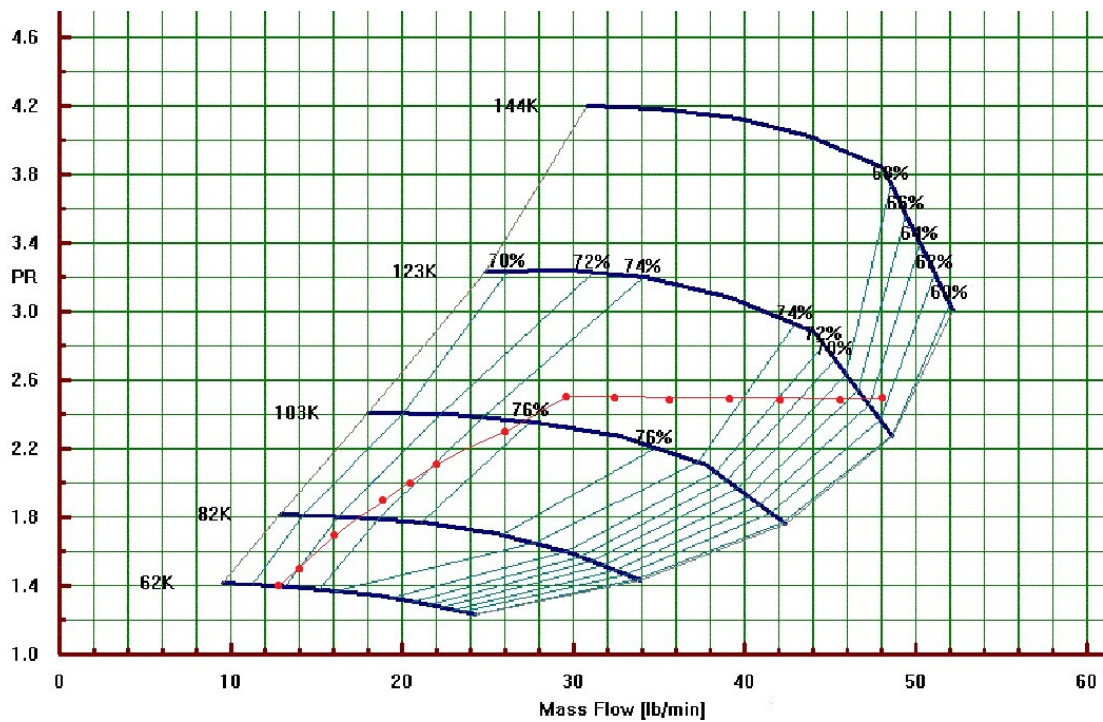
Kuvasta 14 voidaan todeta, että laskelmat ovat olleet totuudenmukaisia. Moottorista saatiin huipputehot 480,4 hevosvoimaa moottorin pyörintänopeuden ollessa 6697rpm. Vääntömomentiksi tuli 555,8 Newton-metriä moottorin pyörintänopeudella 5537rpm. Tehokäyrä alkaa laskea 6800rpm jälkeen, mikä viittaa ahtimen tuoton loppumiseen.

Tehtaan ilmoittama vakio teho RB25DET moottorille on 245 hevosvoimaa ja vääntöä 319 Newton-metriä 0,5bar ahtopaineella. Tehoa saatiin siis 96 % ja vääntöä 74 % lisää alkuperäiseen verrattuna.

Tehonmittauspöytäkirjasta voidaan lukea kullakin kierrosalueella oleva ahtopaine. Ottamalla usean tarkastelukohdan saadaan käyrä piirrettyä kokonaan kompressorikartalle.

RPM	Paine (bar)	Painesuhde	lb/min
3500	0,40	1,40	12,7
3600	0,53	1,53	14,3
3700	0,67	1,67	16,0
3800	0,90	1,90	18,7
3900	1,04	2,04	20,7
4000	1,13	2,13	22,1
4200	1,30	2,30	25,1
4500	1,53	2,53	29,6
5000	1,50	2,50	32,5
5500	1,50	2,50	35,7
6000	1,50	2,50	38,9
6500	1,50	2,50	42,2
7000	1,50	2,50	45,4
7500	1,50	2,50	48,7

Kuva 15. Tehonmittauspöytäkirjasta valittuja tarkastelupisteitä.

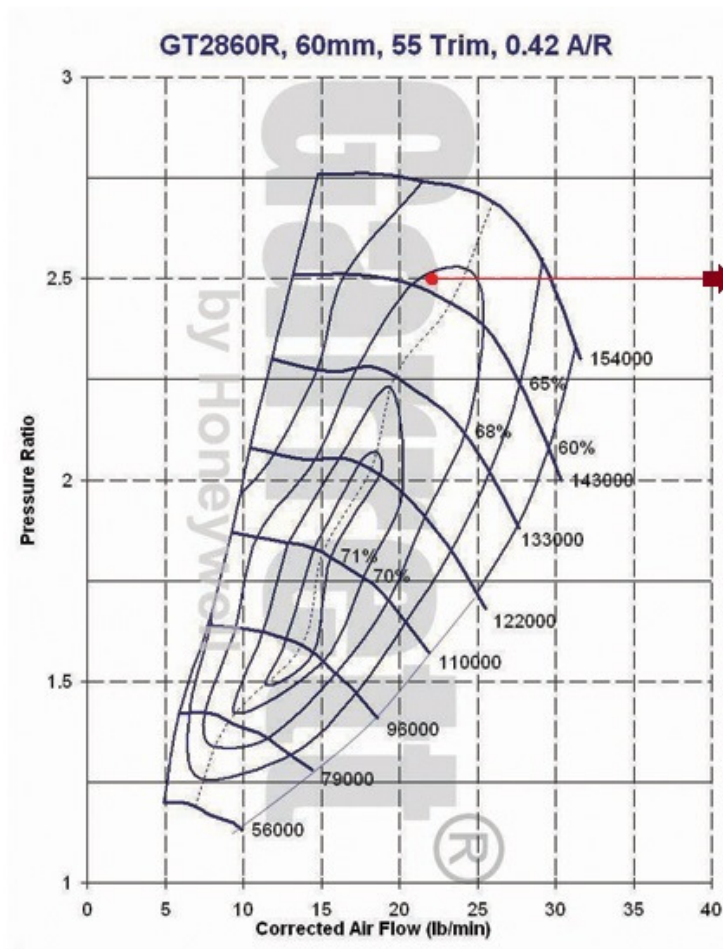


Kuva 16. Holset HX35 kompressorikartta. Karttaan on sijoitettu valitut tarkastelupisteet.

Kuvan 16 kompressorikarttaan on sijoitettu tehonmittauspöytäkirjasta valitut tarkastelupisteet. Sijoitetuista pisteistä ja piirretystä viivasta voidaan päätellä, että ahdin pysyy turvallisella alueella, eikä pääse saavuttamaan sille vahingollista sakkausrajaa.

### 6.1 Esimerkki liian pienestä ahtimesta

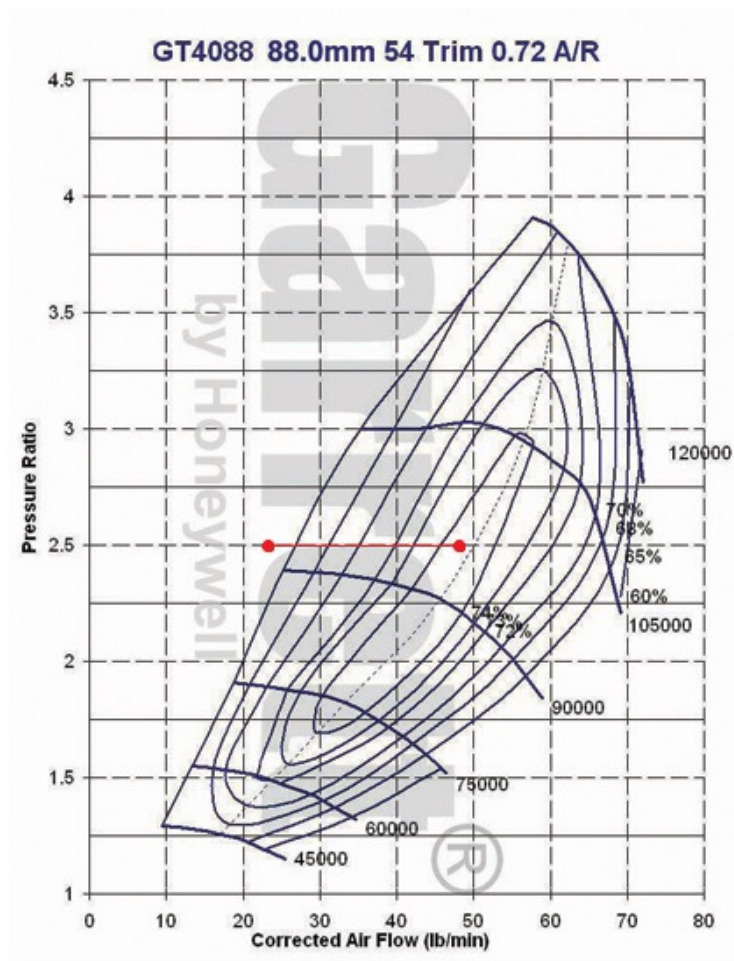
Kuvassa 17 on esitetty yksi huono kompressorin valinta tälle kokoonpanolle. Painesuhteen ollessa 2.5 ja ilmavirta 22,71 lb/min nousee piirretty viiva reilusti kompressorikartan yläreunaan epäedulliselle hyötysuhdealueelle. Viiva menee myös kartan ulkopuolelle ja todennäköisesti tällä ahtimella 2.5 painesuhteella tässä moottorissa tuotto loppuisi kesken.



Kuva 17. Kompressorikartta Garrett GT2860R. (Honeywell Turbo Technologies, 2016)

## 6.2 Esimerkki liian suuresta ahtimesta

Kuvassa 18 on esitetty Garrettin GT4088 -ahdin 0.72 A/R turbiinikotelolla. Piirretystä viivasta voidaan tulkita, että on hyvin suuri riski ylittää sakkausraja, mikä on vahingollista ahtimelle ja moottorille. Jos tätä ahdinta käytettäisiin tässä moottorissa, pitäisi ahtopainetta rajoittaa pienemmillä kierroksilla. Siten ei saada ahtimesta kaikkea hyötyä irti ja turboviive kasvaisi reilusti.



Kuva 18. Kompressorikartta Garrett GT4088. (Honeywell Turbo Technologies, 2016)

## 7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia erilaisia ahtimia ja selvittää ahtimen mitoitusmenetelmää moottoriin. Laskelmissa esitetään miten pakokaasuahdin mitoitetaan ja mitä asioita tulisi ottaa huomioon mitoituksessa.

Työtä tehdessä kävi ilmi, että trendinä on tehdä ahtimesta mahdollisimman pieni, kevyt, pyörivät massat matalaksi. Nykyisin on pyritty poistamaan takavuosien turboviivettä ja saamaan ahtimen käytöstä enemmän luonnollisen imulla toimivan moottorin kaltaista. Myös päästöjenhallinta on tullut tärkeäksi ahdinta suunnitellessa.

Teoriaosan edetessä selvisi myös, että Lysholm-tyyppisestä mekaanisesta ruuviahtimesta on vaikea löytää lisätietoja, vaikka ahdin on merkittävästi parempi kuin Roots-ahdin. Todennäköisesti ahdin olisi ollut aikoinaan sarjatuotannossa paljon suositumpi, jos se olisi kehitetty aikaisemmin. Pakokaasuahdin kuitenkin kehittyi nopeammin ja syrjäytti mekaanisen ruuviahtimen. Tästä syystä ruuviahdinta ei ole käsitelty tässä työssä laajemmin.

Laskelmien teoriaosassa käytiin läpi laskelmaesimerkki työssä käytetyn moottorin ahtimen mitoittamiseen. Laskelmien jälkeen voitiin verrata saatuja tuloksia mitattuihin tuloksiin. Laskelmat osuivat hyvin lähelle mitattuja tuloksia, joten laskelmia voidaan pitää näiltä osin luotettavina.

## LÄHTEET

Crocky Bell. 1997. Maximum Boost: Designing, Testing and Installing Turbocharger Systems. Cambridge: Bentley Publisher

Hiereth Hermann, Prenninger Peter. 2007. Charging the Internal Combustion Engine. Wien, New York: Springer

Juurikkala J. 1981. Autotekniikan käsikirja. Helsinki: Tammi

Kenne Bell 2016. Viitattu 8.10.2016. <http://kennebell.net/KBWebsite/Common/pdfs/twinscrew-vs-roots-fromcatalog.pdf>

Kiiskinen Juha, Suomen autolehti 7/2015, Forssa Print 2015

Kiiskinen Juha, Suomen autolehti 6/2015, Forssa Print 2015

Kiiskinen Juha, Suomen autolehti 3/2015, Forssa Print 2015

Kiiskinen Juha, Suomen autolehti 10/2014, Forssa Print 2014

Kiiskinen Juha, Suomen autolehti 2/2014, Forssa Print 2014

Räsänen Petteri, Suomen autolehti 3/2014. Forssa Print 2014

Garrett by Honeywell 2015. Viitattu 9.12.2015.  
<http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/turbocharger#>

GG Parts Import Oy 2015. Turboahtimen toiminta. Viitattu 28.9.2015  
[http://www.turbotukku.com/turbo\\_toiminta](http://www.turbotukku.com/turbo_toiminta)

Honeywell Turbo Technologies, Viitattu 2.10.2016. <http://www.turbobygarrett.com>

MAN Diesel & Turbo SE. Viitattu 11.3.2016. <http://turbocharger.man.eu/technologies/2-stage-turbocharging>

MTZ 11/2014, Turbocharger with water-cooled aluminum turbine housing.

Swissauto WENKO AG 2015. Viitattu 29.9.2015.  
[http://www.swissauto.com/e/aufladung/projekt\\_detail.jsp?ID\\_Display=20000L](http://www.swissauto.com/e/aufladung/projekt_detail.jsp?ID_Display=20000L)

Turbotekniikka Oy 2015. Viitattu 30.9.2015. <http://www.turbotekniikka.fi/index.php/viritysturbot>