

Timo Hakala

Rinnakkaisahtaminen pakokaasuahtimilla

Opinnäytetyö

Kevät 2011

Tekniikan yksikkö

Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma

Suuntautumisvaihtoehto: Auto- ja työkonetekniikka

Tekijä: Timo Hakala

Työn nimi: Rinnakkaisahtaminen pakokaasuahtimilla

Ohjaaja: Ari Saunamäki

Vuosi: 2011

Sivumäärä: 52

Tässä työssä on tarkoitus selvittää pakokaasuahtamisen perusteita ja pakokaasuahdinjärjestelmän toimintaa erilaisissa moottorin kuormitustilanteissa perusteellisesti ja mahdollisimman selkeästi. Työssä ahtimen eri osia, niiden toimintaa ja niihin liittyviä määreitä käsitellään syventyen ahtimen mitoitukseen ja välijäähdyttimen tehokkuuden laskemiseen, kuin myös ahtopaineen kohottamiseen ja sen aikaansaamiin vaikutuksiin sekä siihen sisältyvään nakutuksen riskiin. Ahtimen ollessa vääränlainen käyttötarkoitukseen, kompressorikarttojen lukeminen ja tulkitseminen ovat ajankohtaisia asioita jotka tulee hallita, joten näiden tulkintaan perehdytäänkin työssä laskelmien kautta mitoittaen esimerkkimoottoriin sopiva ahdin. Käsittelyssä on myös useampia pakokaasuahtimia käyttävät ahtamiskeinot, rinnakkais- ja vaiheittaisahtaminen kahta pakokaasuahdinta käyttäen. Modernien ahtamisjärjestelmien rakenne-eroja, ahtimien sijoittelua ja etuja verrataan yhtä pakokaasuahdinta käyttävään teknologiaan.

Avainsanat: autotekniikka, autoteollisuus, pakokaasuahdin, välijäähdytin

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Faculty: School of Technology

Degree programme: Automotive and Transportation Engineering

Specialisation: Automotive and Work Machine Engineering

Author: Timo Hakala

Title of thesis: Parallel turbocharging

Supervisor: Ari Saunamäki

Year: 2011

Number of pages: 52

The main purpose of this study is to explain the turbocharging and turbocharging applications both technically and using the common sense. The study includes the calculations of the intercooler efficiency and selecting the correct turbocharger for the example application. The example of the turbocharger selection is made using the proper calculations and interpretation of a compressor map using the calculations as basis for the selection.

The different forms of turbocharging are included using the examples of the car industry. The sequential and parallel turbochargings are compared to the single turbocharging.

Keywords: car technology, car industry, turbocharger, intercooler

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	1
Thesis abstract.....	2
SISÄLTÖ.....	3
Kuvio- ja taulukkoluetelo.....	4
Käytetyt termit ja lyhenteet	7
1 PAKOKAASUAHTIMET	8
1.1 Ahdinjärjestelmän toiminta	9
1.2 Ahtimen ja ahdinjärjestelmän rakenne	11
1.2.1 A/R-suhde	13
1.2.2 Hukkaportti.....	14
1.2.3 Ilmanohitusventtiili.....	17
1.2.4 Välijäähdytin.....	19
1.2.5 Laskentaesimerkki ahtoilman jäähdytyksestä	20
1.3 Ahtopaine ja ahtopaineen kohottaminen	23
1.4 Ahtopaine-esimerkkejä.....	25
1.5 Kompressorikartat ja ahtimen valinta	27
2 RINNAKKAISAHTAMINEN	35
2.1 Ahtimien sijainti ja järjestys	35
2.2 Vertailu yhden ahtimen käyttöön	35
2.3 Rinnakkaisahdetun BMW N54-moottorin esittely	36
2.4 Moottorin rakenne	38
2.5 Ahdinjärjestelmä.....	42
2.6 Ahtopaineen hallinta.....	46
3 VAIHEITTAISAHTAMINEN	47
3.1 Borg Warner.....	47
3.2 Opel Twinturbo.....	48
4 PÄÄTELMÄT.....	51
LÄHTEET	52

Kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Kaava ahtotehokkuuden laskemiseksi (Toyota Service, 3.).....	8
Kuvio 2. Pakokaasuahdinjärjestelmä. (Toyota Service, 5.)	10
Kuvio 3. Turboahtimen rakenne räjäytyskuvana. (Toyota Service, 6.).....	11
Kuvio 4. Pakokaasuahtimen keskikotelo. (Toyota Service, 7.).....	13
Kuvio 5. A/R-suhde. (Tin can tuners, [Viitattu 24.4.2011].)	14
Kuvio 6. Ahtopaine alle 0,68 bar. (Toyota Service, 9.)	15
Kuvio 7. Ahtopaine yli 0,68 bar. (Toyota Service, 10.)	16
Kuvio 8. Ilmanohitusventtiilin rakenne. (Toyota Service, 16.).....	18
Kuvio 9. Välijäähdyttimen sijoittelu. (Toyota Service, 13.).....	20
Kuvio 10. Opel Corsa-kiihdytysauton tehomittaustulokset. (Opel Corsa, [Viitattu 31.5.2011].).....	26
Kuvio 11. Kompressorikartta Mitsubishi TD06H-20G- ahtimelle. (Mitsubishi Club, [Viitattu 24.4.2011].).....	28
Kuvio 12. Esimerkkikokoonpanolle valittu ahdin. (Stealth 316, [Viitattu 27.4.2011].)34	
Kuvio 13. N54-moottorin teho- ja vääntökäyrästä verrattuna vapaastihengittävään kolmilitraiseen moottoriin. (BMW N54 Engine Introduction, 9.)	37
Kuvio 14. N54-moottorin kannen poikkileikkaus. (BMW N54 Engine Mechanical, 6.).....	39

Kuvio 15. BMW N54-moottorin rakenne. (BMW N54 Engine Mechanical, 3.).....	40
Kuvio 16. N54-moottorin väljäähdytin ja ilman kulku putkistossa. (BMW N54 Engine Management, 7.).....	42
Kuvio 17 Ahdinjärjestelmän rakenne ja toiminta (BMW N54 Engine Management, 8.).....	43
Kuvio 18. Pakosarja ja ahtimet. (BMW N54 Engine Management, 11.).....	45
Kuvio 19. Reguloitu vaiheittaisahdettu järjestelmä. (Borg Warner, [Viitattu 28.5.2011].).....	47
Kuvio 20. Pyörintänopeus alle 1800 1/min. (Opel Twinturbo, [Viitattu 28.5.2011].)48	
Kuvio 21. Kierrosalueella 1800-3000 1/min. (Opel Twinturbo, [Viitattu 28.5.2011].)49	
Kuvio 22. Pyörintänopeus yli 3000 1/min. (Opel Twinturbo, [Viitattu 28.5.2011].) 50	
Taulukko 1. Ford Sierran kaksilitraisen Cosworth-moottorin dynamometrimittaukset. (Bell 1988, 167.).....	24
Taulukko 2. Saab 9-5 2002 tekniset tiedot. (Saab 9-5, [Viitattu 29.5.2011].)	25
Taulukko 3. Ahtoilman lämpötilan määrittämisessä tarvittava kerroin. (Bell 1988, 157.).....	31
Taulukko 4. N54-moottorin teknisiä tietoja. (BMW N54 Engine Introduction, 8.)... 36	
Taulukko 5. Selitteet kuvioon 17. (BMW N54 Engine Management, 9.).....	44

Taulukko 6. Selitteet kuvioon 18. (BMW N54 Engine Management, 11.).....	45
---	----

Käytetyt termit ja lyhenteet

Pakokaasuahdettu	Moottori, johon on liitetty ahdin lisävoiman tuottamiseksi. Ahdin voi olla joko mekaaninen, joka ottaa kampiakselilta ottaa, tai pakokaasuahdin, joka käyttää moottorin tuottamia pakokaasuja toimintaansa.
Kompressorikartta	Ahtimen valmistajan toimittama kompressorin tuottavuuskäyrästä.
Vapaastihengittävä	Moottori, jossa ei käytetä voiman tuottamiseen lisäkeinona ahtamista. Moottoriin virtaa siis vain ulkoilman paineen omaavaa ilmaa.
Ajettavuus	Ajoneuvon ihanteellinen ajokäytös käyttötarkoituksesta riippuen.
Turboviive	Ahtimen toiminnan ja moottorin tehonnousun alkamista edeltävä viive.
Suorasuihkutus	Suorasuihkutusjärjestelmässä polttoaine suihkutetaan suoraan palotilaan, eikä imusarjaan, kuten vanhemmissa suihkutussuoritusjärjestelmissä.
Öljynjäähdytin	Öljynjäähdytin on lämmönsiirtäjä, jossa virtaava neste luovuttaa lämpöenergiaansa toiselle jäähdytysaineelle, jolloin virtaavan nesteen (tässä tapauksessa öljyn) lämpötila laskee.
Valvetronic	BMW:n käyttämä venttiilinojausjärjestelmä, joka parantaa toiminnallaan moottorin tehokkuutta optimoimalla ilmavirtausta.

1 PAKOKAASUAHTIMET

Suunniteltaessa moottoria pyritään aikaansaamaan optimaalinen polttoaineen kulutuksen, tehon, painon ja koon suhde. Turboahtimen käyttö mahdollistaa suuren tehon verrattuna moottorin kokoon ja painoon. Ahdin edesauttaa saamaan vapaastihengittävää moottoria paremman täyttöasteen. Suuremmissa moottorissa virtaa suurempia määriä ilmaa, joka mahdollistaa suuremman polttoainemäärän syöttämisen palotilaan. Täten moottori tuottaa suurempia määriä tehoa. (Toyota Service, 3.)

SELOSTUS

Tavanomaisessa, vapaasti hengittävässä moottorissa tehollinen täyttöaste on vain 65 - 85 % johtuen imujärjestelmän virtausvastuksesta ja sylintereihin	jääneistä pakokaasuista. Ahdetussa moottorissa tämä hyötysuhde saattaa ylittää 100 %.
$\text{Ahtotehokkuus (\%)} = \frac{\text{Sylintereihin virranneen ilman määrä}}{\text{Sylintereissä oleva ilmamäärä vakio-olosuhteissa*}} \times 100$	
* Vakio-olosuhteet: normaali ulkoilman paine ja lämpötila 20°C	

Kuvio 1. Kaava ahtotehokkuuden laskemiseksi (Toyota Service, 3.)

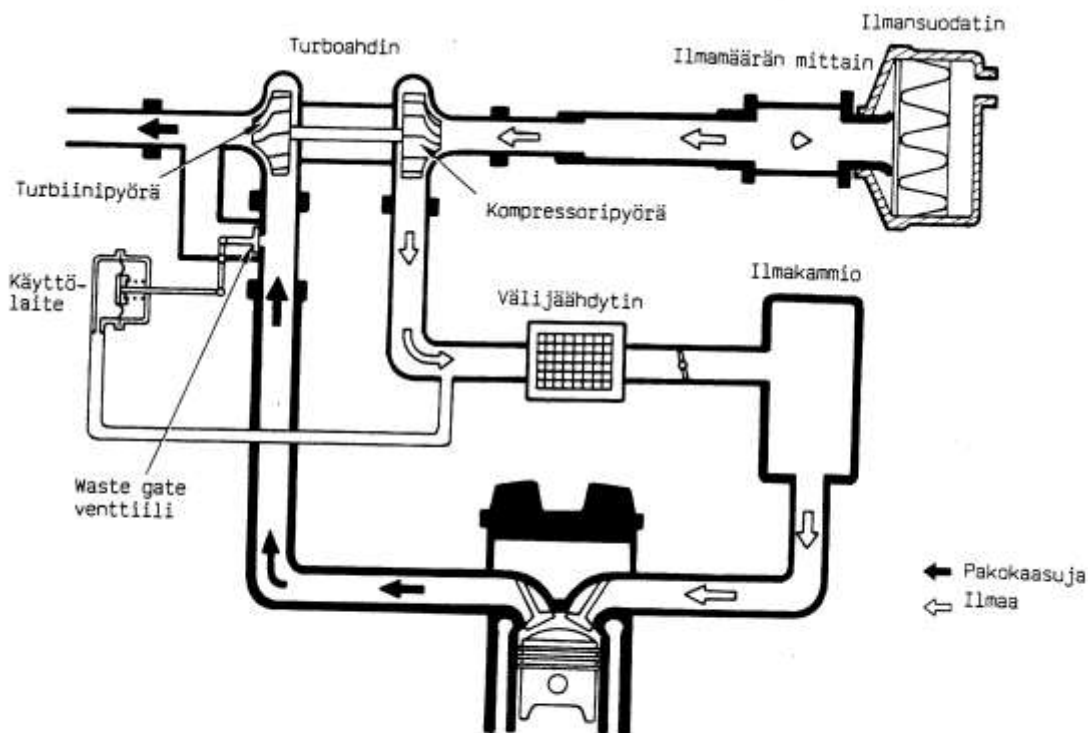
Käyttötarkoitukseen oikein valittu ahdin tarjoaa suuren tehon lisäksi hyvän ajettavuuden, tyhjäkäyntiominaisuudet, pienet päästöt ja matalan kulutuksen. Sylintereiden täyttöastetta ahtaen parantamalla lisätään sylinteriin virtaavan ilman ja polttonesteseoksen määrää, joka toimenpiteenä johtaa tehon kasvamiseen. (Toyota Service, 3.)

1.1 Ahdinjärjestelmän toiminta

Pakokaasuahtimien toimintaan perehdytään syvällisemmin ennen siirtymistä useamman pakokaasuahtimen käytön analysointiin.

Pakokaasuahdin on toimintaperiaatteeltaan ilmapumppu, joka käyttää hyväkseen muissa applikaatioissa hukkaanmenevää energiaa, moottorin tuottamaa pakokaasua. Ahdin syöttää paineenalaista ilmaa sylintereiden palotilaan. Akselin kautta kompressorin siipipyörään yhdistettyä turbiinia pyörittävät pakokaasut. Kompressorin siipipyörä pyörii suurilla nopeuksilla ahtaen ilmaa ahtoputkiston kautta moottorin sylintereihin. Ahdinta pyörittävä voima, pakokaasu, voidaan laskea hyvinkin yksinkertaiseksi metodiksi taloudellisuuden ja lisätehon saavuttamiseksi. (Toyota Service, 5.)

Ahdinta voidaan käyttää sekä bensiini- että dieselmootoreissa, koska ahtimen toiminta on samanlaista molemmissa moottoreissa. Ahdinjärjestelmä on varustettu hukkaporttijärjestelmällä, jolla poistetaan liiallinen pakokaasupaine ja säädetään imuilman ahtopaine. Nykyaikaisissa ratkaisuissa järjestelmässä on myös välijäähdytin, joka laskee ahdetun ilman lämpötilaa ja jäähdyttää täten palotapahtumaa sitä tehostaen. Viileämpi ilma vähentää myös moottorin nakutusta. (Toyota Service, 5.)



TURBOJÄRJESTELMÄ
(SUPRAN 7M-GTE MOOTTORI)

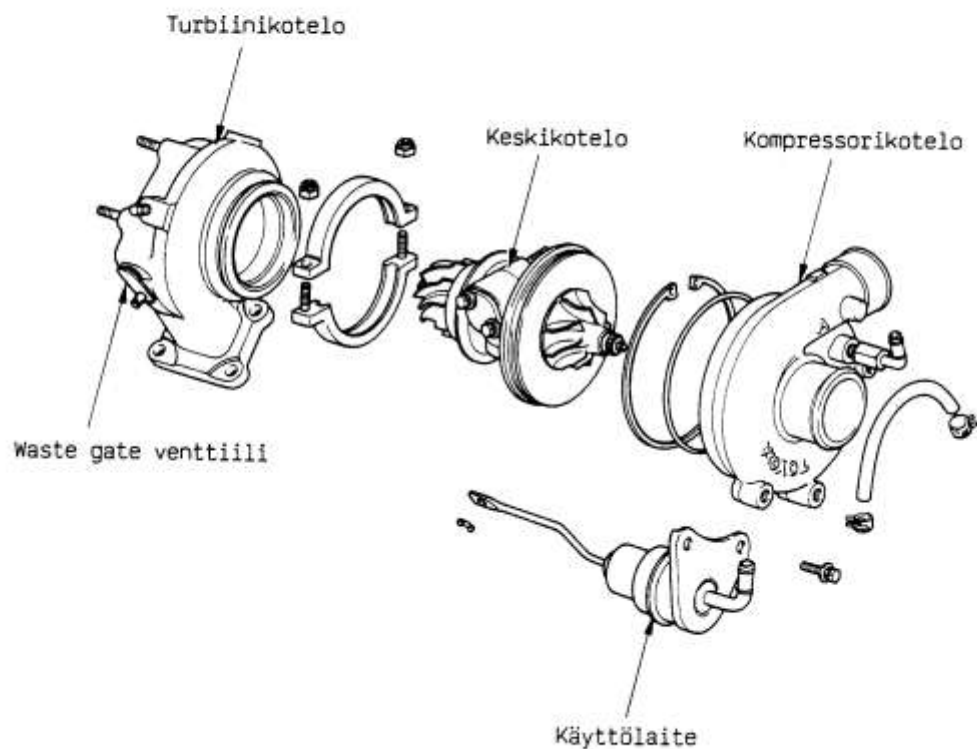
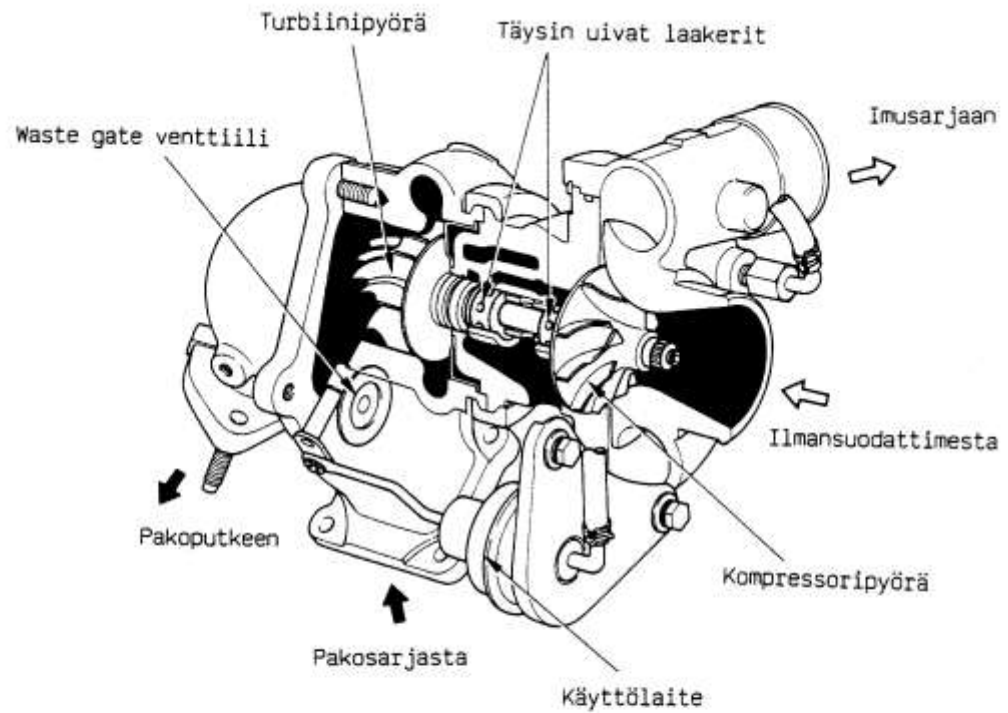
OHP 03

Kuvio 2. Pakokaasuahdinjärjestelmä. (Toyota Service, 5.)

Moottorin pakokaasuenergiaa hyväksikäyttävän turboahdinjärjestelmän toiminta (Kuvio 2) voidaan selostaa yksinkertaisesti seuraavalla tavalla;

Pakokaasut pyörittävät ahtimen turbiinipyörää, joka on akselin välityksellä kytketty kompressoripyörään. Kompressori pyörii erittäin suurella nopeudella syöttäen lisää ilmaa moottorin sylintereihin. Kuviossa ilman liikkumissuunta on osoitettu nuolin. Ahdinjärjestelmä on varustettu hukkaportilla. Tämän avulla voidaan säätää imuilman ahtopainetta. Kuvion esimerkijärjestelmässä käytetään myös välijäähdytintä ahtoilman viilentämiseksi. (Toyota Service, 5.)

1.2 Ahtimen ja ahdinjärjestelmän rakenne

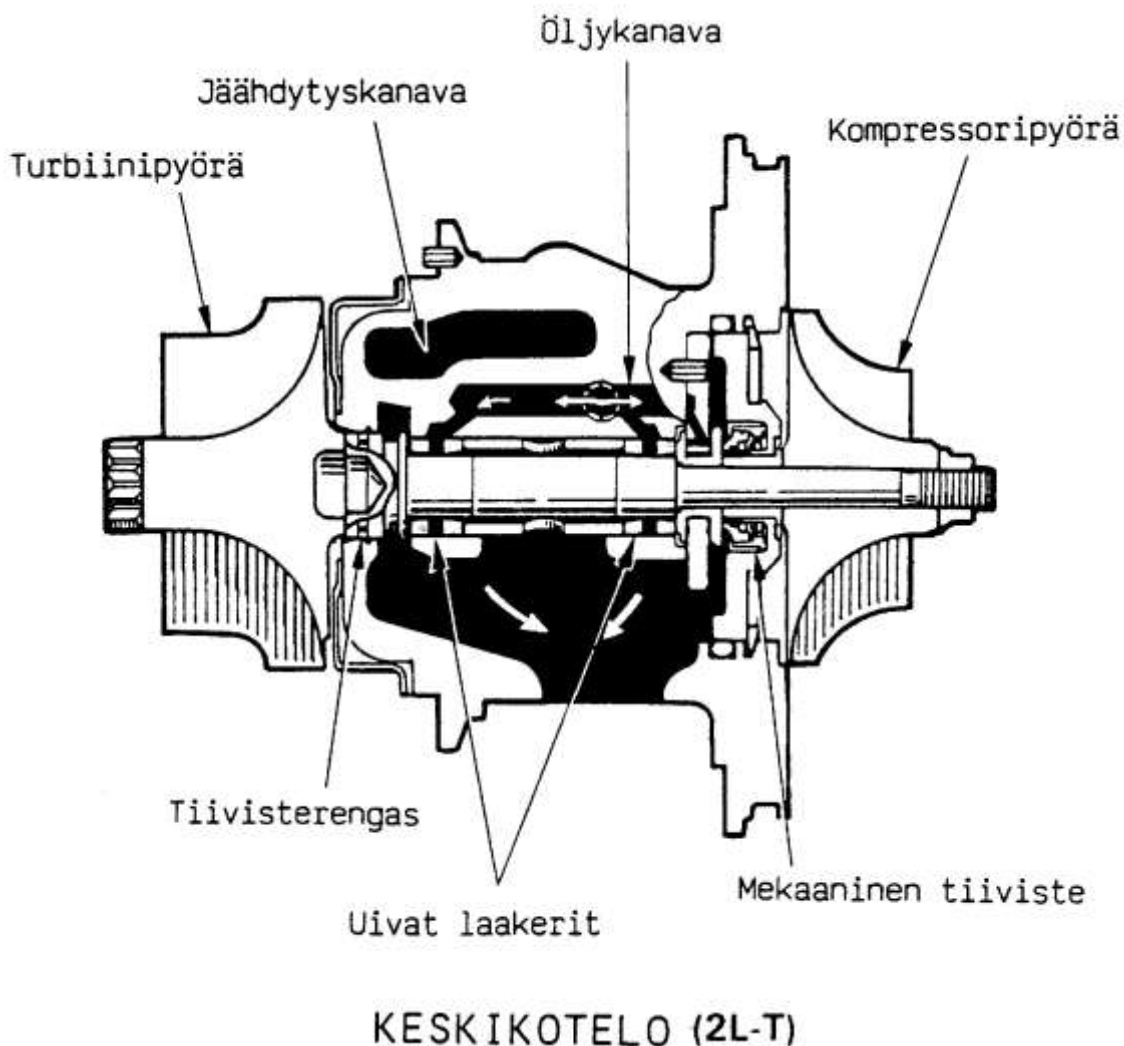


TURBOAHTIMEN RAKENNE (2L-T)

Kuvio 3. Turboahtimen rakenne räjäytyskuvana. (Toyota Service, 6.)

Ahtimen voiteluun käytetään moottoriöljyä, joka virtaa ahtimen keskikoteloon (Kuvio 4) putkien kautta. Voideltuaan ahtimen täysin uivat laakerit, öljy virtaa takaisin öljypohjaan putkea pitkin. Keskikotelossa sijaitsevat laakerit poistavat värinöitä ja varmistavat ahtimen pidemmän kestoiän. Ne pyörivät täysin vapaasti akselin ja kotelon välillä. Täysin uiva rakenne estää kiinnileikkautumisen suurissa (<80000 rpm) nopeuksissa. Mekaaninen tiiviste ja tiivisterengas, tai yksittäinen öljyntiivisterengas estävät moottoriöljyn karkaamisen keskikotelosta. (Toyota Service, 7.)

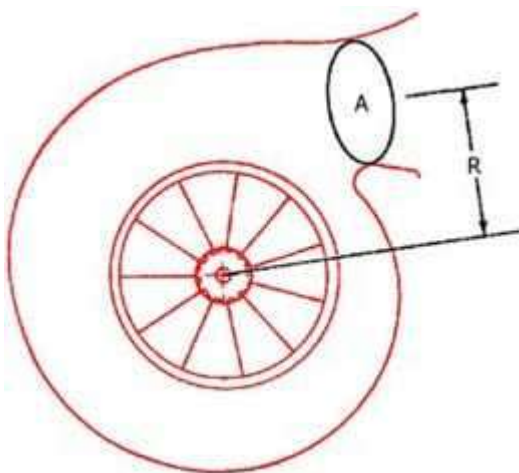
Ahtimen jäähdyttämiseen käytetään moottorin jäähdytysnestettä, joka virtaa termostaattikotelosta keskikotelon jäähdytyskanaviin putkistoa pitkin. Jäähdytettyään ahtimen keskikoteloa se virtaa takaisin moottorin omaan vesipumppuun. Molemmissa toimenpiteissä virtaus on jatkuvaa ahtimen toimiessa. (Toyota Service, 7.)



Kuvio 4. Pakokaasuahtimen keskikotelo. (Toyota Service, 7.)

1.2.1 A/R-suhde

Alexander Graham Bellin teoksen mukaan ahtimen kiihtymisen ja moottorin reagointinopeuden kannalta oleellinen merkitys on ahtimen turbiinipuolen A/R-suhteella. A tarkoittaa ahtimen turbiinikotelon suuaukon pinta-alaa ja R turbiinipyörän keskipisteen ja suuaukon keskipisteen välistä etäisyyttä toisistaan (Kuvio 5). Mitä pienempi suhde on, sitä ahtaampi reitti pakokaasulla on kulkea turbiinille, jolloin pienempi määrä kaasua tarvitaan ahtimen kiihdyttämiseen ja ahtopaineen aikaansaamiseen. (Bell 1988, 152 - 153.)



Kuvio 5. A/R-suhde. (Tin can tuners, [Viitattu 24.4.2011].)

Pieni A/R-suhde on siis edullinen moottorin kierrosalueen alapäässä, koska ahdin kiihtyy nopeammin ja ahtopaine saavutetaan täten lyhyemmällä viiveellä. Pieni arvo taas johtaa kovempaan vastapaineeseen korkeammilla kierroksilla ja kuormituksilla aiheuttaen ahtimen ylikuumentamista ja korkean polttoaineenkulutuksen. (Bell 1988, 152 - 153.)

Suurempi A/R-suhde taas tarkoittaa pakokaasuille vapaampaa virtausta kierrosalueen yläpäässä ja täten suurempaa huipputehoa, mutta alhaisilla kierroksilla ja matalilla kuormituksilla pakokaasumäärän ollessa alhainen on ahtopaine riittämätön eikä ahtimen vaikutus moottorin käyttöön ole vielä havaittavissa. (Bell 1988, 152 - 153.)

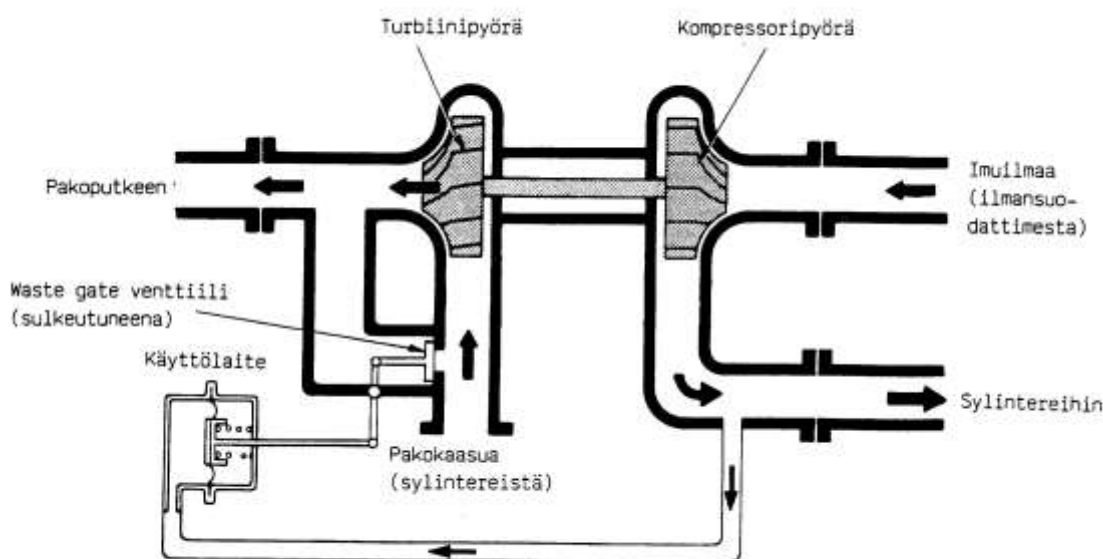
1.2.2 Hukkaportti

Hukkaportteja on olemassa kahdenlaisia; ahtimen sisäisiä ja ulkoisia hukkaportteja. Sisäinen eli integroitu hukkaportti on rakennettu ahtimen turbiinikoteloon. Ulkoinen hukkaportti on nimensä mukaisesti ahtimen ulkopuolella oleva erillinen kokonaisuus, joka sijaitsee pakosarjassa Yleisesti pienissä ahtimissa on sisäinen hukkaportti, kun taas isojen ahtimien kanssa käytetään

ulkoista hukkaporttia. Ulkoisten hukkaporttien käyttö on erittäin suosittua myös kilpa-ajoneuvojen moottorikokoonpanoissa, joissa haetaan suuria tehoja. (Turbo Tech 101 2006.)

Ahtopaineen noustessa liialliseksi, myös moottorin täyttöaste nousee vaarallisiin lukemiin. Moottori voi vahingoittua liian räjähdysmäisestä palamisesta. Ahtopaineen säätämiseen käytetäänkin hukkaportin ohjauslaitteen ja hukkaportin yhteistyötä. Ohjauslaitteen tunnistaessa ahtopaineen saavuttavan määrätyn arvon, se ohjaa hukkaporttia, jonka kautta pakokaasu päästetään ulkoilmaan (enimmäkseen kilpakäyttöön rakennetuissa moottoreissa käytetty ratkaisu) tai ohjataan ohi turbiinipyörän pakoputkistoon. (Toyota Service, 9 - 10.)

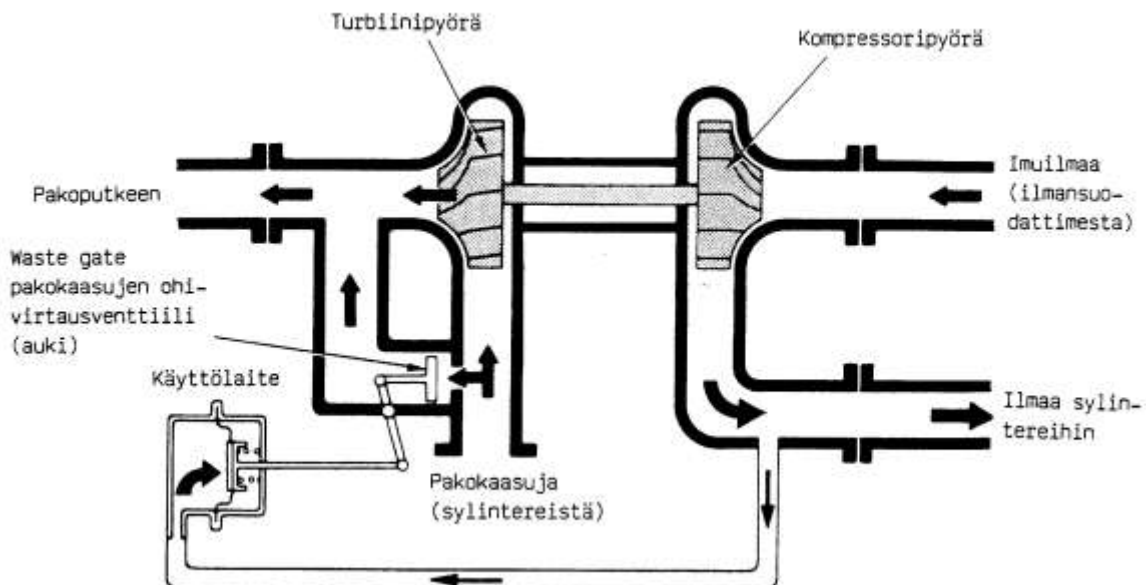
Esimerkki ahtopaineen säädöstä hukkaportin avulla (Kuviot 6 ja 7):



OHP 06

Kuvio 6. Ahtopaine alle 0,68 bar. (Toyota Service, 9.)

Alle 0,68 barin ahtopaineella (Kuvio 6) käyttölaite ei toimi eikä hukkaportin venttiili avaudu. Tällöin koko pakokaasumäärä kulkee siis turbiinikotelon kautta (Toyota Service, 9 - 10).



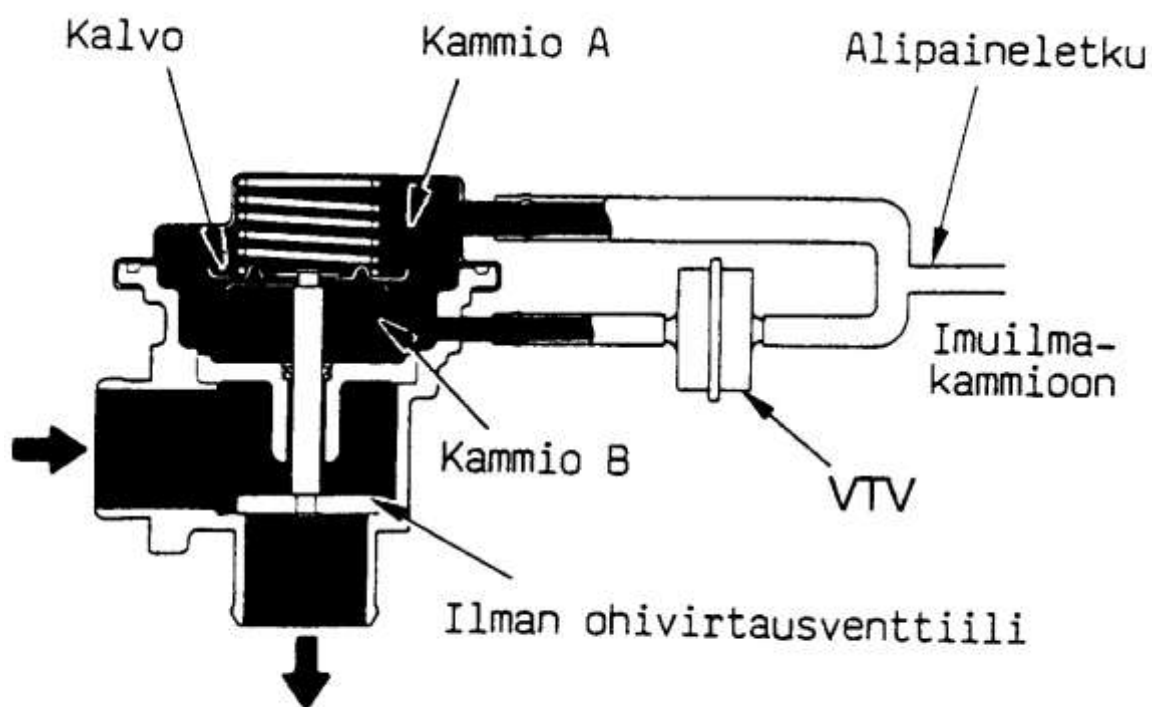
Kuvio 7. Ahtopaine yli 0,68 bar. (Toyota Service, 10.)

Suihkutetun polttoaineen määrän noustessa, eli kaasupoljinta painettaessa, pakokaasupaine nousee vaikuttaen myös ahtopaineeseen kohottavasti. Tuotetun paineen noustessa 0,68 bariin (kuten kuviossa 7), käyttölaite reagoi hukkaporttiin vaikuttavaan pakokaasun paineeseen sekä kalvorasiaansa vaikuttavaan ahtopaineeseen ja käyttölaite avaa hukkaportin. Reaktio johtaa toimintaa, jolloin osa pakokaasuista ohjataan suoraan pakoputkeen tai ulkoilmaan erillisen putkiston kautta vaikuttamatta turbiinipyörään, jolloin turbiinin teho rajoittuu samalla rajoittaen ahtopainetta. Imupaineella ohjattujen hukkaporttien etu on, että ne voidaan avata osittain keskikierrosalueella imuilman liiallisen esipaineistamisen välttämiseksi kulutusarvojen parantamiseksi. Kovemmissa kuormituksilla ne säätyvät suhteessa toivottuun ahtopaineeseen. (Toyota Service, 9 - 10.)

1.2.3 Ilmanohitusventtiili

Ilmanohitusventtiilillä on yksinkertainen tehtävä. Ilmanohitusventtiilejä käyttämällä pyritään eliminoimaan äkilliset ja tarpeettomat ahtopaineen nousut ahdinjärjestelmän imupuolella. Se ohjaa ahtoputkessa olevan ilman joko ulkoilmaan (pääasiallisesti auton konehuoneeseen) tai takaisin kiertoon ennen ahtimen kompressoria. Ahtopaine voi nousta ja aaltoilla äkillisesti esimerkiksi tilanteessa, jossa kaasuläppä suljetaan nopeasti täyskuormituksen aikana. Toimenpide johtaa paineen kohoamiseen kompressorin ja kaasuläpän välisessä ahtoputkistossa, koska reitti imusarjalle sulkeutuu ahtimelta tulevan virtauksen törmätessä sulkeutuneeseen kaasuläppään. Ilman reitin sulkeutuessa ahdin "ahdetaan täyteen" virtaussuunnan kääntyessä takaisin ahtimen kompressorisiipiä kohden, jolloin esiintyy ahdinta voimakkaasti rasittavia korkeataajuuksisia paineaaltoja, jotka ovat havaittavissa ahtimesta kuuluvana vaihtelevataajuuksisena ilmapurkauksena. Suuri takaisinvirtaus saattaa hidastaa ahtimen pyörimisnopeutta, jolloin ahdin reagoi hitaammin avattaessa kaasuläppä uudelleen. Paineaallot aiheuttavat pitkittäissuuntaisia rasituksia ahtimen laakereille täten lyhentäen niiden käyttöikää. Kompressorisiipeen kohdistuva paineisku voi pahimmassa tapauksessa aukaista kompressorin kiinnitysmutterin. Kaasuläppää suljettaessa ilmanohitusventtiili havaitsee paine-eron kaasuläpän ennen, ahtoputkistossa, ja jälkeen, imusarjassa, purkaen virtauksen takaisin ahtoputkistosta kompressorin imupuolelle tai suoraan moottoritalaan. Moottori reagoi nopeammin ahtovirtauksen ollessa moottoriin päin. (Turbo Tech 103 2006.)

Rakenteeltaan ilmanohitusventtiilit ovat mekaanisesti ohjattuja jousikuormitteisia kalvoventtiilejä, joita ohjataan imusarjan paineella. Venttiiliin vaikuttaa imuilmakammioista alipaineletkun kautta tuleva alipaine, joka avaa ja sulkee venttiiliä. Venttiili on rakenteeltaan jaettu kahtia (Kuvio 8); toinen osa on kytketty kammioon A ja toinen kammioon B. Kammioon B johtavassa letkussa on VTV (Vacuum transmitting valve= alipaineohjausventtiili) alipaineen vaikutuksen hidastamiseksi. (Toyota Service, 9 - 10.)



OHP 10

Kuvio 8. Ilmanohitusventtiilin rakenne. (Toyota Service, 16.)

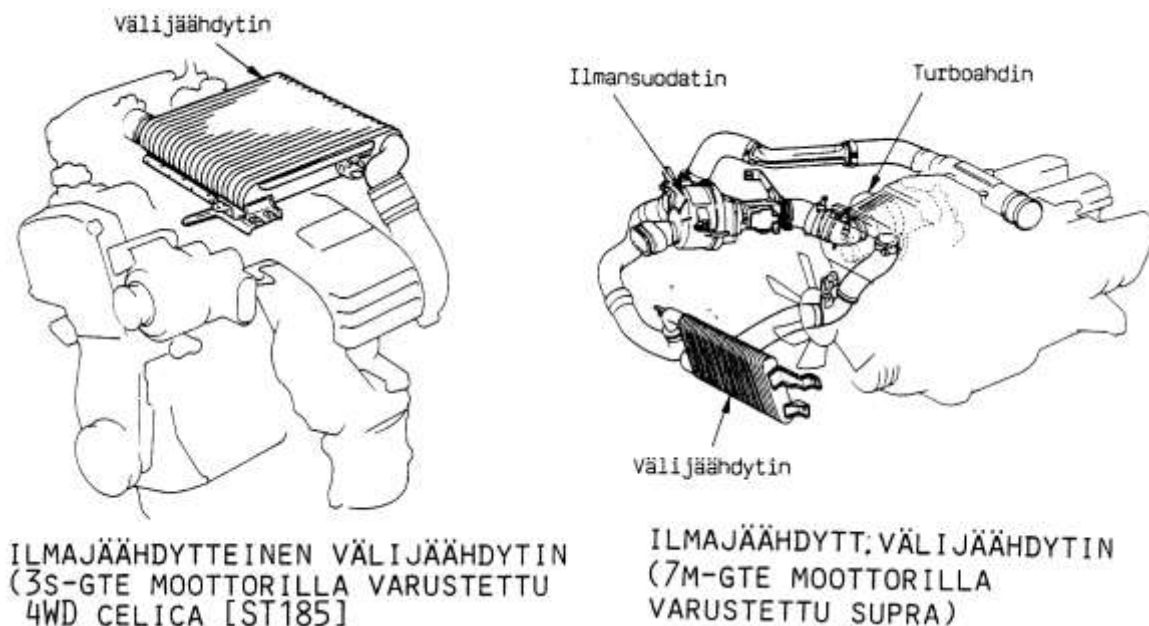
Toimiessaan venttiilissä alipaine vaikuttaa kammioon A käyntinopeuden laskiessa. Alipaineen vaikutusta kammiossa hidastetaan VTV:n avulla. Tällöin kalvo liikkuu kammion A suuntaisesti. Kammiossa A on voimakas alipaine. Venttiili avautuu ja tuloksena ahtopaineen alainen ilma virtaa ilmanohitusventtiiliin kautta takaisin kompressorin tulo puolelle. Tällöin ahtimen ja kaasuläpän välillä vallitseva paine vähenee. Ilmanohitusventtiili on siis tärkeä myös ahdinjärjestelmän komponenttien kestoiän kannalta. (Toyota Service, 16.)

1.2.4 Välijäähdytin

Välijäähdyttiminä käytetään alumiinisia aaltoripaputkijäähdyttimiä. Rakenteeltaan nämä muistuttavat tavallisia nestejäähdyttimiä (Bauer 2002, 473).

Välijäähdytintä käytetään ahtoilman viilentämiseen palotapahtuman optimoimiseksi ja moottorin lämpökuormituksen alentamiseksi. Ahtimen toimiessa moottoriin imetyn ahdetun ilman lämpötila nousee sen tiheytyessä. Tähän tarkoitukseen järjestelmässä on välijäähdytin, joka toiminnallaan alentaa moottoriin virtaavan paineenalaisen ilman lämpötilaa, täten parantaen moottorin täyttöastetta ja moottorin tehoa. Ilman alhaisempi lämpötila vähentää nakutusvaaraa, parantaa ajettavuutta ja laskee polttoaineen kulutusta. Välijäähdyttimiä on vesi- ja ilmajäähdytteisiä. Ilmajäähdytteiset välijäähdyttimet ovat yleisempiä yksinkertaisen rakenteensa ja toimintansa vuoksi. Tämän ratkaisun käyttö on myös valmistajalle halvempaa. Ilmajäähdytteiset välijäähdyttimet käyttävät hyödykseen ajoviimaa tai erillistä sähkötoimista, joissain konstruktioissa molempia. Välijäähdytin voidaan sijoittaa eri paikkoihin auton rakenteesta riippuen (Kuvio 9). (Toyota Service, 9 - 10.)

Välijäähdyttimen teho on riippuvainen kolmesta tekijästä; välijäähdyttimen koko, sen ympärillä virtaavan jäähdytysilman lämpötila ja virtausnopeus. Sijoittelulla voidaan vaikuttaa ilman virtausnopeuteen ja sitä voidaan tehostaa lisäämällä sähköinen tuuletin. Ulkoilman lämpötilaan ei ymmärrettävistä syistä päästä suuremmin vaikuttamaan. Hyvin suunniteltu ja toteutettu välijäähdyttimellä varustettu järjestelmä putkituksineen laskee ahtopainetta maksimissaan kymmenen prosenttia, johtuen ilman virtaamiseen vaikuttavista putkiston kitkoista. (Toyota service, 13.)



Kuvio 9. Välijäähdyttimen sijoittelu. (Toyota Service, 13.)

Corky Bellin mukaan ahtimen aiheuttamaa imuilman lämmönousua voidaan verrata välijäähdyttimen jälkeisen ilman lämpötilaan, josta saadaan selville ilma-ilmatyypin välijäähdyttimen hyötysuhde. Seuraavat laskelmat perustuvat taulukkoarvoihin ja teoreettisiin oletuksiin. Arvot käytännössä ovat kokoonpanokohtaisia ja riippuvaisia vallitsevista olosuhteista. (Bell 1997, 50 - 54.)

1.2.5 Laskentaesimerkki ahtoilman jäähdytyksestä

Olkoon ulkolämpötila T_a 26,67 °C ja kompressorilta lähtevä ilma T_{co} 93,33 °C. Otetaan huomioon myös absoluuttinen nollapiste, joka on 273,15 celsiusastetta. Absoluuttinen lämpötila on tällöin $(273.15 + 93.33 + 26.67)^\circ\text{C} = 393.15^\circ\text{C}$. Asennettaessa välijäähdytin jonka hyötysuhde on 60%, voidaan laskea sen poistaman lämmön olevan $0.6 \times 93.33^\circ\text{C} = 55.998^\circ\text{C}$, jolloin absoluuttinen lämpötila välijäähdyttimen jälkeen on $273.15^\circ\text{C} + 26.67^\circ\text{C} + (93.33^\circ\text{C} - 55.998^\circ\text{C}) = 337.152^\circ\text{C}$.

Tästä voidaan laskea ilman tiheyden muutos:

$$D_c = T_{a1} / T_{a2} \quad (1)$$

jossa T_{a1} on alkuperäinen absoluuttinen lämpötila (°C)

T_{a2} on lopullinen absoluuttinen lämpötila (°C)

Esimerkin arvoilla laskien muodostuu tiheyden muutos seuraavasti:

$$D_c = (273.15^\circ\text{C} + 93.33^\circ\text{C} / 273.15^\circ\text{C} + 26.67^\circ\text{C}) - 1 = 0.22233$$

Ilmamolekyylien määrä palotilassa on siis noussut noin 22 %:lla, josta voidaan päätellä tehonnousun olevan myös 22 %, joka tarkoittaisi alun perin 100 hv:n moottorissa 122 hv:n tehoa välijäähdytyksen ansiosta.

Välijäähdyttimen virtausvastus johtaa pieniin painehäviöihin ja vaikuttavat täten saatuun realistiseen tehoon. Painehäviö voidaan laskea kaavalla:

$$P_h = 1 - (p_m / p_k) \quad (2)$$

jossa p_m on välijäähdyttimeltä lähtevä absoluuttinen paine (bar)

p_k on ahtimelta lähtevä absoluuttinen paine (bar)

Ilmakehän paine on 1.01325 bar. Esimerkkitapauksen autossa olkoon käytetty ahtopainetta 0.7 bar ja välijäähdyttimen aiheuttama häviö 0.13 bar:

$$P_h = 1 - (1.01325\text{bar} + 0.7\text{bar} - 0.13\text{bar}) / (1.01325 - 0.7\text{bar}) = 0.075879$$

Täten välijäähdyttimen aiheuttama painehäviö on noin 7,6 %.

Kompressorin aiheuttama lämpötilannousu voidaan laskea kaavalla:

$$T_n = T_{co} - T_a \quad (3)$$

jossa T_{co} on kompressorilta lähtevän ilman lämpötila (°C)

T_a on ulkoilman lämpötila (°C)

T_n on lämpötilan nousu (°C)

Esimerkkitapauksen kompressorin aiheuttama lämpötilan nousu:

$$93.33 \text{ °C} - 26.67 \text{ °C} = 66.66 \text{ °C}$$

Välijäähdyttimen poistama lämpö lasketaan seuraavasti:

$$T_{pl} = T_{co} - T_{io} \quad (4)$$

jossa T_{pl} on poistettu lämpö (°C)

T_{co} on kompressorilta lähtevän ilman lämpötila (°C)

T_{io} on välijäähdyttimeltä poistuvan ilman lämpötila (°C)

Täten voidaan laskea esimerkkitapauksessa poistettu lämpö:

$$93.33 \text{ °C} - 55.998 \text{ °C} = 37.332 \text{ °C}$$

Välijäähdyttimen hyötysuhde voidaan laskea seuraavasti:

$$E_i = (T_{co} - T_i) / (T_{co} - T_a) \quad (5)$$

jossa Ei on välijäähdyttimen hyötysuhde

Tco on Tco on kompressorilta lähtevän ilman lämpötila (°C)

Ti Ti on välijäähdyttimeltä poistuvan ilman lämpötila (°C)

Ta on ulkoilman lämpötila (°C)

Esimerkkitapauksessa tämä tarkoittaa

$$(93.33\text{ °C} - 55.998\text{ °C}) / (93.33\text{ °C} - 26.67\text{ °C}) = 0.560036$$

56% hyötysuhdetta välijäähdyttimelle. (Bell 1997, 53 - 54).

Laskelmien perusteella voidaan todeta välijäähdyttimestä olevan suuri hyöty moottoria ahdettaessa. Välijäähdyttimen lisääminen lisää moottoritehoa palotapahtuman tehostuessa esimerkkitapauksen mukaisesti teoreettisesti 22 hevosvoimaa 100 hevosvoiman moottoriin. Kylmempi ilma laskee palotapahtuman lämpötilaa ja moottorin komponenttien rasitus vähenee.

1.3 Ahtopaine ja ahtopaineen kohottaminen

Ahtopainetta kohottamalla pyritään saamaan aikaan kompressorin tuottaman paineen ja täten moottoritehon nousua. Käytettävää ahtopainetta voidaan kohottaa moottorin ohjausyksikön uudelleenohjelmoinnilla ja erilaisilla keinoin, joilla annetaan muutettu painetieto hukkaportin kellolle ja täten myöhäistetään ahtimen hukkaportin avautumista. Ahtopainetta nostaessa on kuitenkin otettava huomioon polttoaineseoksen muutos, ahtopainetta nostettaessa ilman määrä suhteessa polttoaineen määrään nousee, jolloin seos on vääränlainen ja nakutus on todennäköisempää. (Bell 1988, 166.)

Ahdin syöttää palotilaan tiheämpää ilmaa ja tällöin polttoaineen ja ilman seos on kokonaisuutena tiheämpi. Tiheämpi seos johtaa korkeampiin palotapahtuman lämpötiloihin, epätasaiseen seoksen palamiseen ja sylinteripaineen kohoamiseen. Seos ei pala hallitusti, vaan räjähdysmäisesti, josta johtuva paineen äkillinen

nousu rasittaa ja venttiilejä johtaen lopulta jonkin näistä rikkoutumiseen. (Turbo Tech 101 2006.)

Suurempi turbomoottorin ahtopaine ja/tai tehokkaampi ahtoilmän jäähdytys johtaa kohonneeseen moottoritehoon etenkin vain siinä tapauksessa, että polttoaineen suihkutuslaitteisto pysyy ajan tasalla ja syöttää polttoainetta tarvetta vastaavasti. (Bell 1988, 166.)

Taulukko 1. Ford Sierran kaksilitraisen Cosworth-moottorin dynamometrimittaukset. (Bell 1988, 167.)

Mittaus 1		Mittaus 2		Mittaus 3		
Käynti- nopeus (1/min)	Teho (hv)	Vääntö (Nm)	Teho (hv)	Vääntö (Nm)	Teho (hv)	Vääntö (Nm)
2000	46	164	51	183	51	180
2500	85	243	93	266	95	271
3000	110	262	118	279	122	290
3500	127	259	139	282	141	287
4000	143	255	163	290	167	297
4500	171	270	190	301	196	310
5000	188	267	202	287	211	301
5500	195	252	213	275	219	283
6000	200	237	220	262	227	270
6500	-	-	216	237	235	258
6800	-	-	-	-	242	254

Taulukossa 1 ensimmäisessä mittauksessa on käytetty vakio moottoria ja tehdasasetuksia. Toiseen mittaukseen auton moottorinohjauksen elektroniikkaa on säädetty antamaan 0,9 barin ahtopaine ja seosta rikastettu, välijäähdytin on vaihdettu kooltaan kaksinkertaiseen alkuperäiseen verraten. Kolmannessa

mittauksessa edellisen mittauksen muutosten lisäksi ahtimen turbiinikotelo on vaihdettu ja asennettu lisäsuutin. (Bell 1988, 167.)

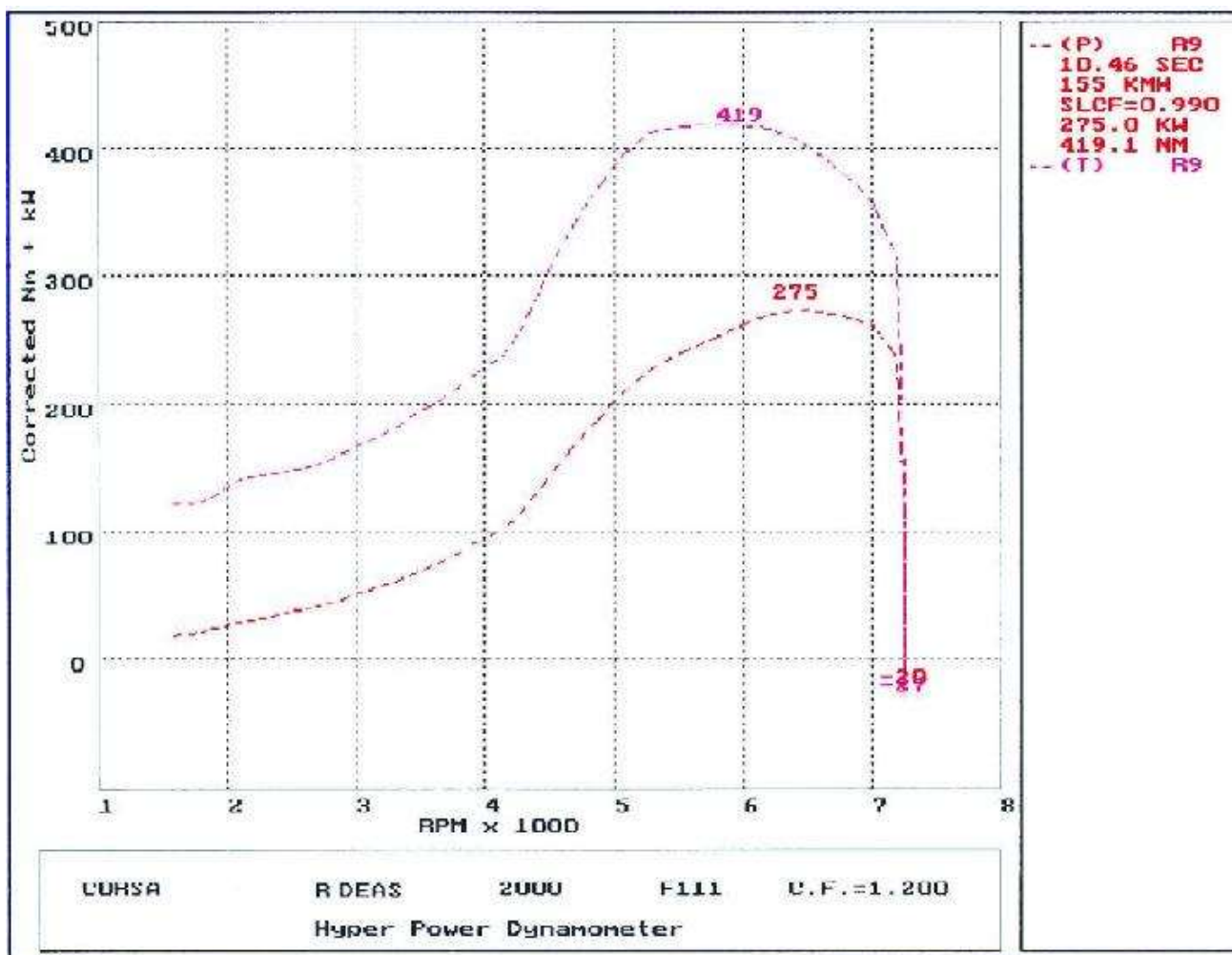
Taulukkoa tutkittaessa käy selväksi, että ahtopainetta nostamalla on tehollinen nousu aikaansaatu jo alakierroksilta lähtien. Mittauksen 2 tapauksessa ahtopainetta on nostettu alkuperäisestä 40%.

1.4 Ahtopaine-esimerkkejä

Saab on tunnettu ahdettujen henkilöautojen valmistaja. Esimerkkimallina toimii ensimmäisen sukupolven Saab 9-5, jota valmistettiin vuosina 1997-2009. 2.3-litraisten moottorien teknisten tietojen (Taulukko 2) perusteella nähdään että pieni ahtopaine riittää tämänkokoisessa moottorissa suuriin teho- ja vääntölukemiin.

Taulukko 2. Saab 9-5 2002 tekniset tiedot. (Saab 9-5, [Viitattu 29.5.2011].)

Moottori	2,0t Ecopower	2,3t Ecopower	2,3 Turbo Ecopower
Iskutilavuus (dm ³)	1,985	2.290	2.290
Sylintereitä	4	4	4
Halkaisija/isku (mm)	90/78	90/90	90/90
Teho (EEC)	110 kW (150 hv) 5 500 r/min	136 kW (185 hv) 5 500 r/min	184 kW (250 hv) 5 300 r/min
Vääntö-momentti (EEC)	240 Nm / 1 800 r/min	280 Nm / 1 800–3 500 r/min	350 Nm / 1 900–4 000 r/min Hetkellisesti 370 Nm
Ahtopaine	0,40 bar	0,40 bar	0,55 bar
Puristussuhde	9,3:1	9,3:1	9,3:1
Suositteltu polttoaine	95 RON	95 RON	98 RON



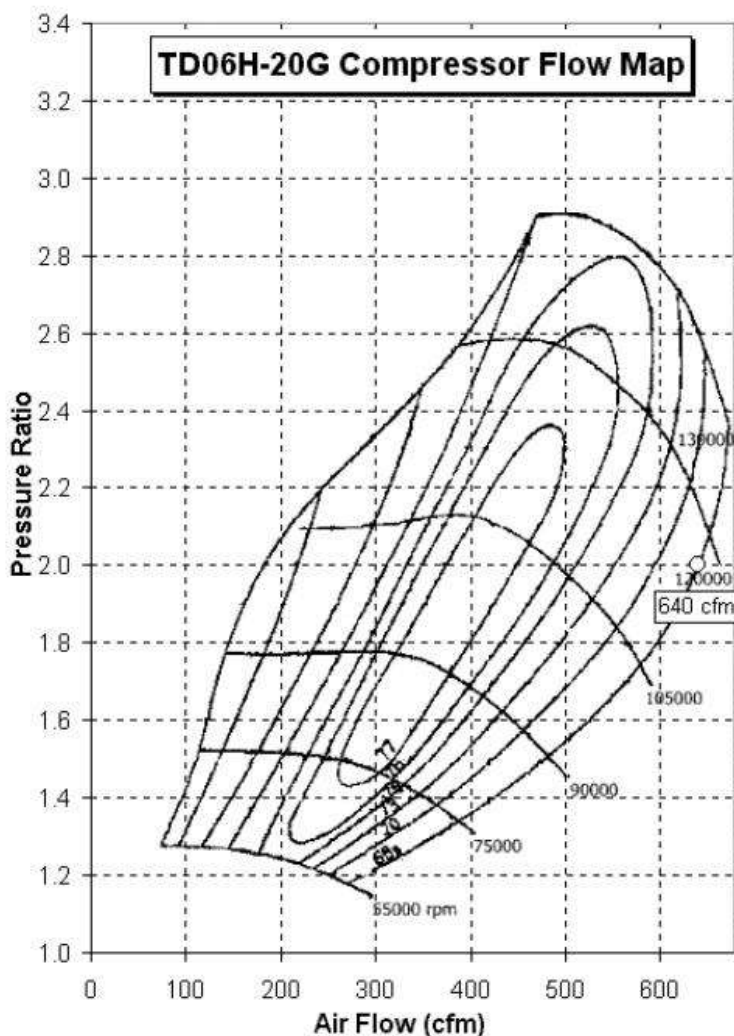
Kuvio 10. Opel Corsa-kiihdytysauton tehomittaustulokset. (Opel Corsa, [Viitattu 31.5.2011].)

Autourheilun maailmasta esimerkkinä käytettäköön Etelä-Afrikassa rakennetun Opel Corsan kiihdytysauton suoritusarvoja (Kuvio 10). Auto saavuttaa 275 kilowatin renkailta mitatun huipputehon 1,4 barin ahtopaineilla moottorin käyntinopeudella 6400 1/min, väännön saavuttaessa huippulukeman 419 Nm käyntinopeudella 6000 1/min. Auton moottori on kaksilitrainen bensiinimoottori. Corsa pystyy parhaimmillaan 12,17 sekunnin loppuajoihin 400 metrin matkalla paikaltaan kiihdytettäessä loppunopeuden noustessa 197 kilometrin tuntinopeuteen. (Opel Corsa, [Viitattu 31.5.2011].)

Volkswagenin mekaanisella ahtimella ja pakokaasuahdimella varustettu 1,4-litrainen ja teholtaan 168 hv:n bensiinimoottori toimii parhaimmillaan jopa 2,5 barin ahtopaineella molempien ahtimien ollessa käytössä. (VW Tsi, [Viitattu 31.5.2011].)

1.5 Kompressorikartat ja ahtimen valinta

Lisätehoa haettaessa ahtimen jäädessä ominaisuuksiltaan riittämättömäksi, on aiheellista siirtyä eri ahtimen käyttöön. Tarpeisiin vastaavan ahtimen valinta ei kuitenkaan ole pelkästään ahtimen ostamista, vaan siihen sisältyy paljon muutakin, jos kokoonpanosta halutaan ihanteellisesti toimiva. Valinta suoritetaan ahtimen aikayksikössä pumppaaman ilman määrän ja ahtimen painesuhteen perusteella. Ahtimien valmistajat toimittavat ahtimiinsa kompressorikarttoja (Kuvio 11), jotka auttavat oikean ahtimen valinnassa kuhunkin moottoriin. (Bell 1988, 153.)



Kuvio 11. Kompressorikartta Mitsubishi TD06H-20G- ahtimelle. (Mitsubishi Club, [Viitattu 24.4.2011].)

Alhaalla oleva arvo (cfm) ilmaisee kompressorin ja moottorin läpi kulkevan ilman massavirtausta tietyn ajan sisällä. Useimmat valmistajat ilmoittavat arvon yksiköissä lb/min (paukaa per minuutti), mutta myös arvot cfm ja kg/s^2 ovat käytössä.

Vasemmalla kompressorikartassa nähdään sakkausraja. Sakkausrajalla ahtimessa esiintyy virtauksen epätasaisuutta, jolloin paine vaihtelee voimakkaasti sykkien. Paineiskut aiheuttavat pidemmällä aikavälillä ahtimen komponenttien hajoamisen. Käytännössä sakkaamisen kuulee hakkaavana, taajuudeltaan

vaihtelevana äänenä. Sakkauksen esiintyessä kuormituksen aikana on todennäköistä, että autossa käytetty kompressorin on liian suuri. Useimmiten sakkaukset esiintyvät kuitenkin kaasuläppää suljettaessa ahtopaineen alueella toimimisen jälkeen. Vellova paineaalto hajoaa, kun ahtimen pyörintänopeus laskee tarpeeksi ja palataan tasaisen paineen alueelle. Tasaisen painealueen saavuttamista helpottaa ilmanohivirtausventtiilin käyttö. (Turbo Tech 103 2006.)

Ahtimen pyörintänopeuden viivat kertovat ahtimen jatkuvat pyörintänopeudet. Ahtimen pyörintänopeuden kasvaessa painesuhde ja massavirta kasvavat sen mukana. Tukehtumisrajan lähetyillä, kartan oikeassa reunassa, pyörintänopeutta indikoivat viivat lähenevät toisiaan. Ahtimen tukehtuminen ja korkeat pyörintänopeudet ovat täten yhteydessä toisiinsa. (Turbo Tech 103 2006.)

Kartan oikeassa laidassa on kompressorin tukehtumisraja. Garrett käyttää tukehtumisrajan määrittämiseksi pistettä, jolloin ahtimen hyötysuhde laskee alle 58 prosenttiyksikön. Hyötysuhteen laskun ohessa ahtimen pyörintänopeus nousee liialliseksi, jopa ylittäen sallitut pyörintänopeudet. Ahdinta mitoitettaessa on tärkeää ottaa huomioon rajan kulku omaan toiminta-alueeseen suhteutettuna kompressorin kokoa valittaessa. (Turbo Tech 103 2006.)

Kompressorikartan keskellä ovat saarekkeet kertovat ahtimen hyötysuhteen. Nämä samankeskiset alueet pienenevät keskialuetta kohden, jossa pienin saareke kertoo parhaan hyötysuhteen alueen. Ahdinta mitoitettaessa tulisikin pyrkiä tämän saarekkeen alueelle optimaalisen ahtimen ja kompressorin löytämiseksi. (Turbo Tech 103 2006.)

Mitoitettaessa oikeanlainen ahdin kokoonpanoon mitoituksen tulee olla tietyssä suhteessa ahtopaineeseen, liiallisen ahtopaineen johtaessa sekä ahtimen ylisuureen pyörintänopeuteen että kompressorin joutumiseen sakkaurajalle. Tällaisten ongelmien välttämiseksi on laskettava erinäisiä laskelmia ja tehtävä vertailuja ahdinvalmistajien toimittamiin kompressorikarttoihin. (Bell 1988, 155 - 158.)

Seuraavissa laskelmissa on käytetty seuraavia yksiköitä:

1. paine psi
2. lämpötila F
3. ilman virtausmäärä cfm eli ft³/min

Ensimmäisenä määritetään kompressorin painesuhde seuraavalla kaavalla:

$$Pr = (Bp+Ap) / Ap \quad (6)$$

jossa Pr on painesuhde

Bp=Ahtopaine (psi)

Ap=Ulkoilman paine (psi)

Esimerkkitapauksessa ulkoilman paine merenpinnan tasolla on 14,7 psi. Autoa käytetään 1500 metrin korkeudella merenpinnasta ja paineriippuvuuden likimääräissääntönä pidetään, että 300m:n nousussa paine laskee 0,5 psi. Tällöin paineen lasku on 2,5 psi.

Ahtopaineeksi halutaan 11.5 psi, jolloin saadaan painesuhteeksi:

$$Pr = (11.5 + 14.7 - 2.5) / (14.7 - 2.5) = 1.94$$

Tämän jälkeen valitaan painesuhdetta vastaava arvo taulukosta 3:

Taulukko 3. Ahtoilman lämpötilan määrittämisessä tarvittava kerroin. (Bell 1988, 157.)

PR	F	PR	F	PR	F	PR	F
1,35	0,089	1,80	0,181	2,25	0,258	2,70	0,325
1,40	0,100	1,85	0,192	2,30	0,266	2,75	0,331
1,45	0,110	1,90	0,199	2,35	0,274	2,80	0,338
1,50	0,120	1,95	0,208	2,40	0,281	2,85	0,345
1,55	0,130	2,00	0,217	2,45	0,289	2,90	0,352
1,60	0,142	2,05	0,225	2,50	0,296	2,95	0,358
1,65	0,152	2,10	0,234	2,55	0,303	3,00	0,365
1,70	0,162	2,15	0,242	2,60	0,311	3,05	0,377
1,75	0,172	2,20	0,250	2,65	0,318	3,10	0,390

Painesuhteen määrittämisen jälkeen määritetään tiheysuhde, jonka laskutoimitus sisältää oletuksia. Ongelmana on puristuvan ilman lämpeneminen. Kompressorin ollessa ideaalinen ja sen adiabaattisen hyötysuhteen ollessa 100 %, kokoonpuristuva ilma lämpenee:

$$I_t = F \times (A_t + 460) \quad (7)$$

jossa I_t on ideaalinen lämpötilan nousu

F on kerroin taulukosta 2

A_t on ulkoilman lämpötila (°F)

Ulkoilman lämpötila olkoon 80°F, jolloin ilman lämpötilan nousu ideaalitapauksessa:

$$I_t = 0.208 \times (80 + 460) = 112.3 \text{ °F}$$

100 %:n hyötysuhteen kompressoria ei ole olemassa, joten lasketaan todenperäisempi ilman lämpeneminen:

$$R_t = (I_t \times 100) / E \quad (8)$$

jossa R_t on todellinen lämpötilan nousu

I_t on ideaalinen lämpötilan nousu (°F)

E on kompressorin hyötysuhde (%)

Kompressoreita on monenlaisia, mutta 60 %:n oletaminen hyötysuhteeksi on melko hyvä arvio ja useimilla kompressoreilla onkin tämä hyötysuhde. Ahtoilman lämpötilan nousu nyt:

$$R_t = (112.3 \text{ °F} \times 100) / 60 = 187.2 \text{ °F}$$

Ahtimelta moottorille lähtevän ahtoilman kokonaislämpötila saadaan laskemalla yhteen ulkoilman lämpötila ja lämpötilan nousu:

$$D_t = A_t + R_t \quad (9)$$

jossa D_t on ahtoilman kokonaislämpötila (°F)

A_t on ulkoilman lämpötila (°F)

R_t on lämpötilan nousu (°F)

Esimerkkitapauksen arvoilla laskien:

$$D_t = (80 + 187.2) \text{ °F} = 267.2 \text{ °F}$$

Painesuhde ja ahtoilman lämpötila on nyt laskettu, joten lasketaan kompressorille tiheysuhde:

$$DR = ((At + 460) \times Pr) / (Dt + 460) \quad (10)$$

jossa DR on tiheysuhde

At on ulkoilman lämpötila (°F)

Pr on painesuhde

Dt on Ahtoilman lämpötila (°F)

Laskettuja arvoja käyttäen kompressorin tiheysuhteeksi saadaan:

$$DR = ((80 + 460) \times 1.94) / (267.2 + 460) = 1.44$$

Viimeisenä lasketaan kompressorilta moottorille virtaavan ahtoilman määrä, jota verrataan ahdinvalmistajan toimittamaan kompressorikarttaan. Tämän vertailuin perusteella voidaan sitten päätellä, toimiiko kompressorin oikealla alueella vai joutuuko se sakkausrajalle tai ylikierroksille. (Turbo Tech 103 2006.)

$$CF = L \times RPM \times VE \times DR \quad (11)$$

jossa CF on ilmamäärä (ft³/min)

L on moottorin iskutilavuus (l)

RPM on moottorin maksimikäyttökierrokset (1/min)

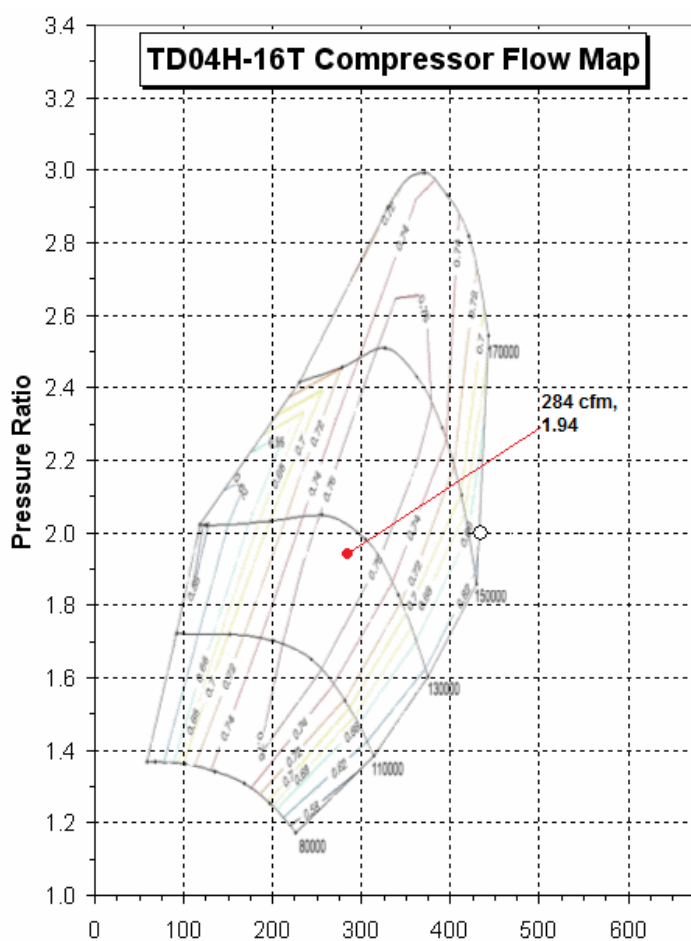
VE on moottorin volymetrinen hyötysuhde

DR on tiheysuhde

Volymetriseksi hyötysuhteeksi oletetaan arvo 0.9, kun moottoriksi valitaan kaksilitrainen, 6200 rpm kiertävä moottori vakionokilla:

$$CF = (2 \times 6200 \times 0.9 \times 1.44) / 56.6 = 284 \text{ ft}^3/\text{min}$$

Laskettuja arvoja avuksi käyttäen voidaan todeta Mitsubishiin valikoimissa olevan TD04-16t- ahtimen täyttävän vaatimukset. Kompressorikartassa (kuvio 12) arvot sijoittuvat parhaan hyötysuhteen saarekkeelle, josta voidaan päätellä ahtimen toimivan valituissa olosuhteissa ja kyseisellä moottorin käyttöalueella parhaalla mahdollisella tavalla.



Kuvio 12. Esimerkkikokoonpanolle valittu ahdin. (Stealth 316, [Viitattu 27.4.2011].)

2 RINNAKKAISAHTAMINEN

2.1 Ahtimien sijainti ja järjestys

Rinnakkaisahdetussa moottorissa ahtimet sijaitsevat omissa pakosarjoissaan moottorimallista riippuen joko lohkon molemmilla puolin (V-rakenteiset moottorit) tai lohkon samalla puolella (rivimoottorit). Rinnakkaisahdettaessa pakokaasuahdit ahtavat yhtäaikaaisesti, joten niiden järjestyksellä ei sinällään ole väliä. Usein ne ryhmitellään moottoressa kuitenkin sen mukaan mitä sylintereitä ne ahtavat. Sylinterien 1,2,3 turboahdin on siis ahdin numero 1 ja sylinterien 4,5,6 ahdin numero 2, käytettäessä esimerkkinä kuusisylinteristä rivimoottoria. (BMW N54 Engine Management, 15.)

2.2 Vertailu yhden ahtimen käyttöön

Toimintaperiaatteeltaan rinnakkainahdetun moottorin ahdinjärjestelmä ei suuresti eroa yksittäistä ahdinta käyttävästä ahdinjärjestelmästä. Ahtimien toiminta on samanlaista ja samallatavoin ohjattua, ainoastaan joitain komponentteja on kaksinkertainen määrä, kuten ahtimet, hukkaportit, ilmanohitusventtilit. Vaiheittainahdetussa moottorissa ahtimien ohjaus lisää komponentteja. Rinnakkaisahtamisella haetaan pienempää turboviivettä ja parempaa moottorinkäytöstä. Pienen ahtimen eduksi voidaan laskea ahtimen kiihdyttämiseen tarvittavan kaasumäärän vähäisyys; pienikokoisissa turbiinin siipipyörissä on pienemmät massat joita tarvitsee kiihdyttää. Tällöin samalla akselilla turbiinin siipipyörän kanssa oleva kompressori saavuttaa nopeammin suuremman ahtopaineen lyhyemmässä ajassa. Kahdella pienemmällä turboahdimella saadaankin yhtä isoa ahdinta nopeammin suuri moottoriteho käyttöön ja moottorin reagointi kaasuläpän asentoon optimaalisemmaksi.

Rakennekustannukset ja moottoritilan käyttö otetaan myös huomioon. V-koneisissa konstruktioissa kahden ahtimen käyttö on myös helpompaa putkitusten ja ahtimen sijainnin kannalta. Ahtimet voidaan sijoittaa moottorin eri puolille kunkin sylinteriryhmän yhteyteen, eikä täten lisätillaa moottorin päältä tai edestä tarvita

ilmanottoputkiston ja ahtimen sijoittamisen vuoksi. Kummankin ahtimen putkitukset ja välijäähdyttimet voidaan sijoittaa omiin paikkoihinsa, tai putkitukset vetää yhdelle välijäähdyttimelle. Tällä pyritään vähentämään painehäviöistä johtuvaa ahtimen toimintaviivettä.

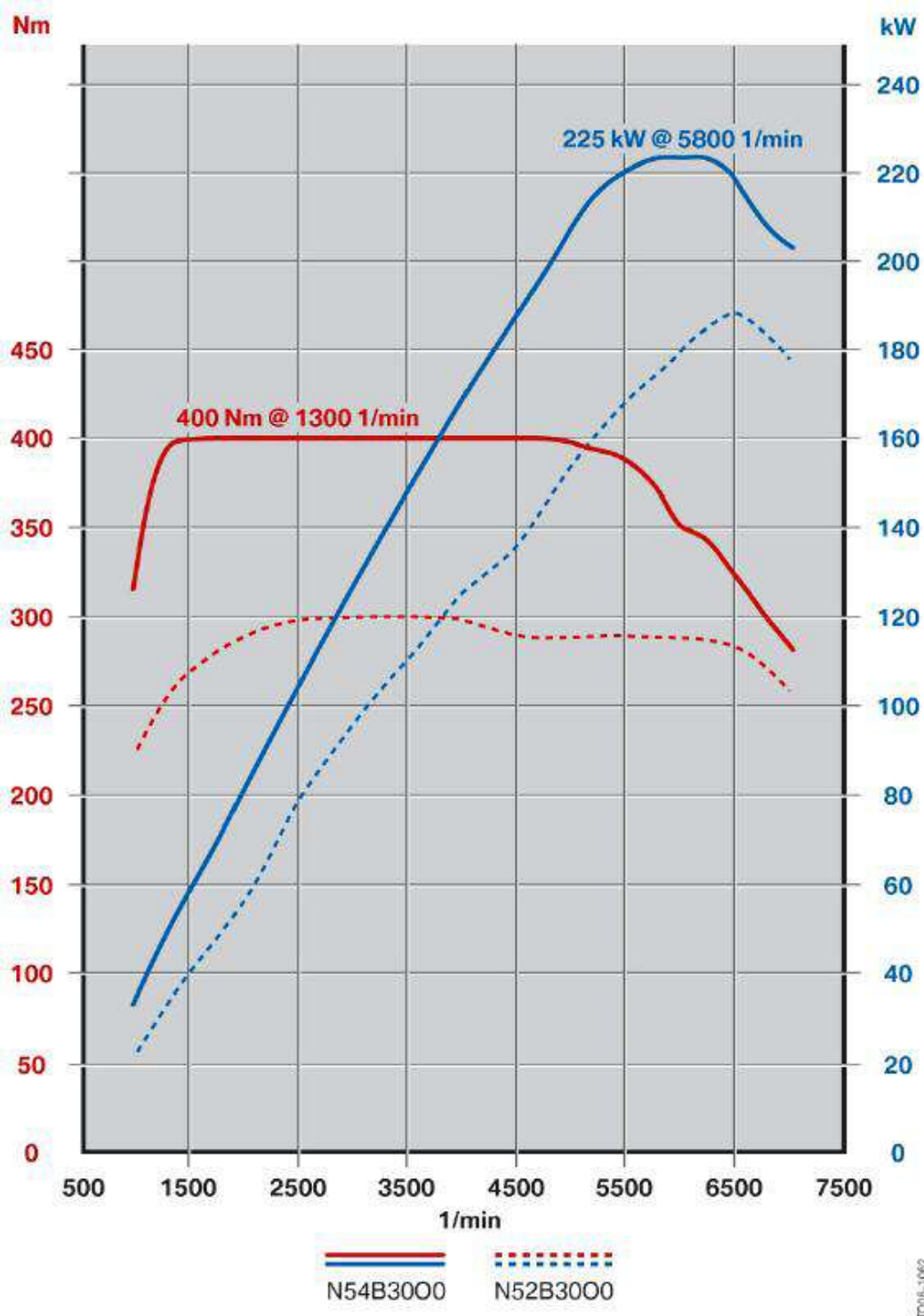
Yhtä ahdinta käytettäessä joudutaan tekemään kompromissi alakierrosten väännön ja yläkierrosten tehon väliltä. Vaiheittainahdetussa moottorissa eduksi voidaan laskea erikokoisilla ahtimilla ja näiden laajemmalla yhteisellä kompressorikartalla ja toiminta-alueella aikaansaatu laajempi käyttöalue, moottorin nopeampi reagointi sekä lisätehon ja -väännön aikaansaaminen. Moottori käyttäytyy optimaalisemmin eri kuormitustilanteissa. Kulutuslukemiin päästään vaikuttamaan, koska jompikumpi ahdin ahtaa koko ajan eli seosta ja palotapahtumaa saadaan tällöin tehostettua koko käyttöalueen mitalta (Hiereth & Prenninger 2003, 105 - 106).

2.3 Rinnakkaisahdetun BMW N54-moottorin esittely

Vuonna 2006 BMW:n esittelemä moottoriperhe NG6 sai jäsenekseen N54-moottorin, rinnakkaisahdetun 3,0-litraisen bensiinimoottorin. Aiemmat bensiinimoottoriset pakokaasuahdimella varustetut mallit BMW:llä olivat vuonna 1974 BMW 2002 Turbo ja BMW 745i vuonna 1980. N54-moottorin virallinen merkintä on N54B30O0, jossa O tarkoittaa korkeampaa teholuokkaa ja 0 ensimmäistä sukupolvea tästä moottorista. (BMW N54 Engine Introduction, 6 - 7.)

Taulukko 4. N54-moottorin teknisiä tietoja. (BMW N54 Engine Introduction, 8.)

Selite	Arvo
Moottorityyppi	Rivimallinen kuusisylinterinen
Tilavuus (cm ³)	2979
Iskunpituus/sylinterin halkaisija (mm)	84/89.6
Paras moottorin teho (kw/bhp) kierrosnopeudella	225/300 @ 5800 1/min
Paras vääntömomentti (Nm) kierrosnopeudella	400 @ 1300-5000 1/min
Suurin kierrosnopeus	7000 1/min
Tehopainosuhte (kg/kW)	0.83
Tilavuuskohtainen teho (kW/l)	75.5
Puristussuhde	10.2:1
Venttiilejä per sylinteri	4
Imuventtiilin halkaisija (mm)	31.44
Pakuventtiilin halkaisija (mm)	28



Kuvio 13. N54-moottorin teho- ja vääntökäyrästä verrattuna vapaastihengittävään kolmilitraiseen moottoriin. (BMW N54 Engine Introduction, 9.)

N54-moottorin suoritusarvoja verrattaessa (Kuvio 13) vapaastihengittävään saman iskutilavuuden ja sylinterimäärän omaavaan moottoriin huomataan ahtimien

käytöllä aikaansaatu hyöty. Huipputeho on käytettävissä aiemmin ja sitä on 35kW enemmän kuin vapaastihengittävissä moottoriversiossa. Tehokäyrät nousevat kutakuinkin samankaltaisesti ahdetun moottorin kasvattaessa moottoritehon eroa kierrosten kasvaessa. Vääntökäyrän muotoa tutkaillessa nähdään 100Nm suuruinen huippuarvojen ero. Ahdetussa moottorissa huippuvääntö on käytettävissä paljon aikaisemmin ja pitempään. Vapaastihengittävän moottorin vääntöarvo myös laskee hieman ahdetun moottorin arvosta jatkuessa tasaisena kierrosalueen 1300-4000 1/min. Ahtimien tullessa pyörimisnopeutensa rajoille moottorin yläkierroksilla ahdetun moottorin vääntöarvo notkahtaa jyrkemmin ja voimakkaammin kuin vapaastihengittävän. Moottoriteho kuitenkin nousee vielä tässä vaiheessa, jolloin auton ajettavuus on samaa luokkaa vapaastihengittävän kanssa.

2.4 Moottorin rakenne

Moottorin kestoajan varmistamiseksi on moottorissa käytettävä vahvistettuja ja vapaastihengittävistä moottoreista eroavia osia. Suuremman tehon ja väännön kestävyden varmistamiseksi N54-tyypin moottorissa on käytetty muusta moottoriperheestä eroavia osia. Moottorin kansi on valmistettu alumiinista. Sylinteriputket on valmistettu valamalla. Moottorissa on myös huomioitu suorasytytysjärjestelmän tarvitsemat muutokset rakenteessa (Kuvio 14). Painevaletun kampikammion rakenne on valmistettu vastaamaan väännön määrällistä nousua. Vapaastihengittävissä samantilavuuksisissa N52-moottorissa käytetään magnesiumista ja alumiinista valmistettua kampikammiota. (BMW N54 Engine Mechanical, 3 - 9.)



Kuvio 14. N54-moottorin kannen poikkileikkaus. (BMW N54 Engine Mechanical, 6.)

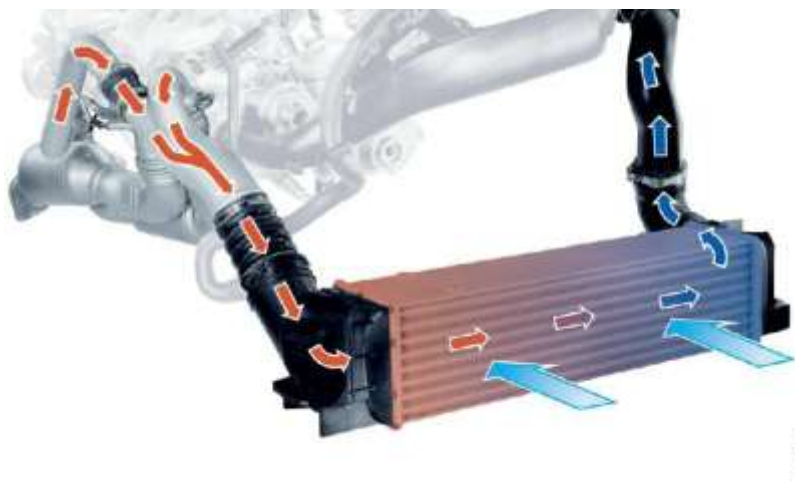


Kuvio 15. BMW N54-moottorin rakenne. (BMW N54 Engine Mechanical, 3.)

Männät on suunniteltu suorasytytysjärjestelmän vuoksi erilaiseksi kuin vapaastihengittävässä malleissa. Männän laki on suunniteltu ihanteellista seoksenmuodostumista ajatellen erimuotoiseksi. Kampiakseli on valmistettu takoteräksestä suuremman moottoritehon vuoksi, kun muissa moottoriperheen moottoreissa se on valurautainen. Kannentiiviste on kutakuinkin samankaltainen vapaastihengittävän N52-tyyppin moottorin kanssa. Kannentiivisteiden reuna ei kuitenkaan ole ulkoneva kuten muissa moottoreissa, koska kansi on alumiinia eikä kontaktikorroosiota esiinny. Venttiilikoneiston suojakotelo on muovinen ja eroaa rakenteeltaan muihin moottoreihin, koska ehdettu N54-moottori ei käytä BMW:n Valvetronic-järjestelmää. Valvetronic-järjestelmä ohjaa imuventtiileitä ja niiden

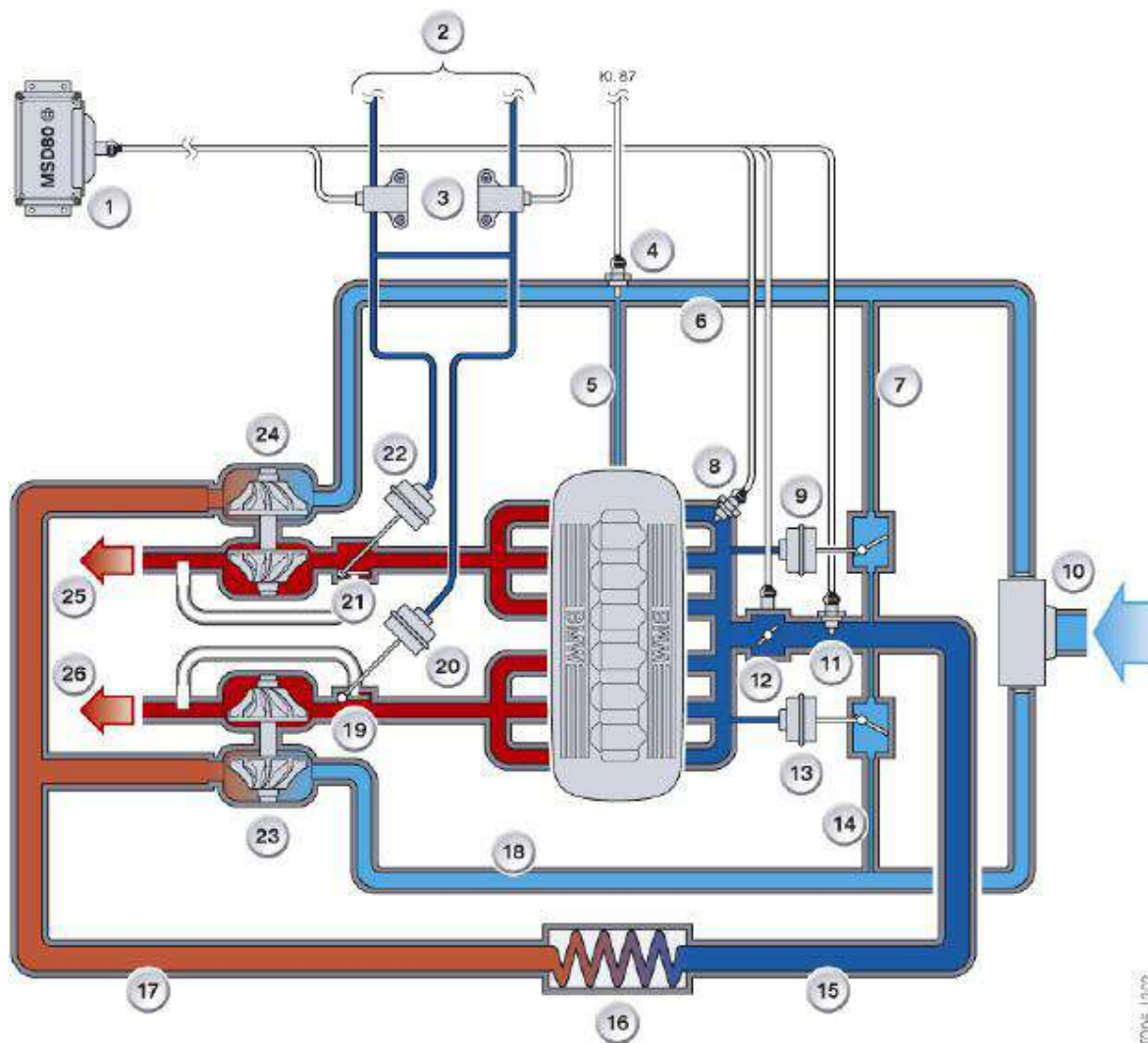
nousua. Moottorin tehoa ohjataan sisäänjohdettavan ilmamäärän avulla, jolla tehostetaan palotapahtumaa. Järjestelmä on siis turboahtamisen kanssa samaan päämäärään pyrkivä, ja täten hyödytön ahdetussa moottorissa. Venttiilikoneiston suojakotelon eroavuus johtuu myös moottorin erilaisesta kampikammion ilmanvaihtojärjestelmästä. Kaksoisahdetussa N54-moottorissa on suorasuihkutusjärjestelmä ulospäin aukeavine pietsosuuttimineen (Kuvio 13), joka pystyy 200 bar tuottoon. Erona ruiskutusjärjestelmiin, joissa polttoaine suihkutetaan imukanavaan suorasuihkutusjärjestelmässä ilman ja polttoaineen seos muodostetaan palotilassa. Moottorin jäähdytystä on parannettu sähkötoimisele vesipumpulla. Ulkoisessa öljynjäähdyttimessä ajoviima jäähdyttää moottoriöljyä pyrkien pitämään öljyn lämpötilan ihanteellisessa 90-100 celsiusasteen lämpötilassa. Pienempitehoisissa autoissa öljypohja riittää öljyn jäähdyttämiseen. N54-moottorilla varustetut autot käyttävät kahta rosterista pakoputkea. Katalysaattorit, joita on yksi pakosarjan välittömässä läheisyydessä ja kaksi auton alla, kuin myös lambdasensorit ovat samat kuin N52-moottorissa käytetyt. Moottori eroaa tietenkin vapaastihengittävästä versioista myös kahdella ahtimellaan ja ahtoilman välijäähdyttimellään sekä imuilmaputkiston rakenteella. Vaihteiston ja moottorin liittämiseen käytettävien pulttien sijainti on myös hieman erilainen muihin moottoriperheen moottoreihin verraten. Moottorin ohjausjärjestelmä on eriävä moottorisarjan muista versioista, ahdinjärjestelmän ohjaukseen liittyvän lisätarpeen vuoksi. N54 -moottori on rinnakkaisahdettu kahdella Mitsubishi *TD03L4W-10TK3*-pakokaasuahtimella. Rinnakkaisahtaminen vaatii moottorilta erityisrakenteita myös ilmanvaihtojärjestelmän osalta. Ilmanvaihtojärjestelmän putkitus (Kuvio 16) eroaa suuresti vapaastihengittävästä moottoreista ahtimien oikean toiminnan varmistamiseksi. (BMW N54 Engine Mechanical, 3 - 9.)

2.5 Ahdinjärjestelmä



Kuvio 16. N54-moottorin välijäähdytin ja ilman kulku putkistossa. (BMW N54 Engine Management, 7.)

Ahtimet käyttävät samaa välijäähdytintä (Kuvio 16). BMW:n käyttämän välijäähdyttimen on laskettu alentavan parhaimmillaan imuilman lämpötilaa noin 80 celsiusasteella, käyttöolosuhteista riippuen. (BMW N54 Engine Management, 6 - 7.)

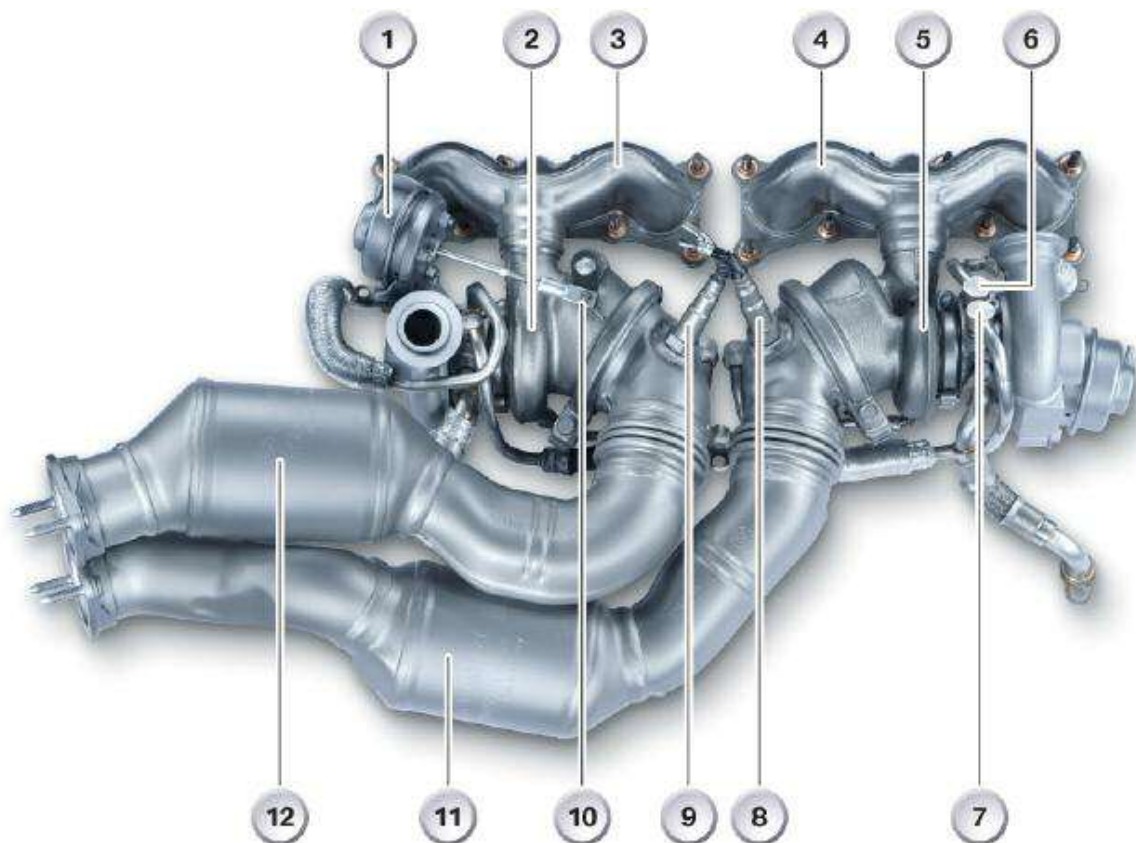


Kuvio 17 Ahdinjärjestelmän rakenne ja toiminta (BMW N54 Engine Management, 8.)

Taulukko 5. Selitteet kuvioon 17. (BMW N54 Engine Management, 9.)

Numero	Selite	Numer o	Selite
1	MSD80 Moottorinohjauksikkö	14	Ohivirtausilman linja, ahdin 1
2	Linjat imupumpulle	15	Ahtoputkisto, imupuoli
3	Sähköpneum. paineenmuunnin	16	Välijäähdytin
4	PTC-lämmitin, ohivirtauskaasut	17	Ahtoputkisto
5	Ohivirtauslinja, ahtokäyttö	18	Imuputkisto, ahdin 1
6	Ahtoputkisto, ahdin 2	19	Hukkaportti, ahdin 1
7	Ohivirtausilman linja, ahdin 2	20	Hukkaportin kello, ahdin 1
8	Imusarjan painetunnistin	21	Hukkaportti, ahdin 2
9	Ohivirtausventtiili, ahdin 2	22	Hukkaportin kello, ahdin 2
10	Ilmansuodatin	23	Pakokaasuahdin 1
11	Ahtoilmatusunnistin ja lämpötilatunnistin	24	Pakokaasuahdin 2
12	Kaasuläppä	25	Pakoputkiston lähtö, ahdin 2
13	Ohivirtausventtiili, ahdin 1	26	Pakoputkiston lähtö, ahdin 1

Ahdinärjestelmä on varustettu tunnistimilla viileän ilman määrän optimoimiseksi kuhunkin kuormitustilanteeseen sopivaksi. Turboahtimen toimiessa turbiinien ja kompressorien siipipyörät pyörivät jopa 200 000 kierrosta minuutissa, turbiinin lämpötilan noustessa jopa 1050:een celsiusasteeseen. Ahtimia jäähdytetään moottoriöljyn ja jäähdytysnesteen avulla. N54-moottorin sähköisen vesipumpun avulla ahdinta jäähdytetään jäännöslämmön hävittämiseksi moottorin jo ollessa sammutettuna. Tällä estetään myös ahtimien laakerikoteloissa olevien öljyjen liiallinen lämpeneminen. (BMW N54 Engine Management, 8 - 9.)



TD/06-1163

Kuvio 18. Pakosarja ja ahtimet. (BMW N54 Engine Management, 11.)

Taulukko 6. Selitteet kuvioon 18. (BMW N54 Engine Management, 11.)

Numero	Selite
1	Hukkaportin kello, ahdin 2
2	Pakokaasuahdin 2
3	Pakosarja 2
4	Pakosarja 1
5	Pakokaasuahdin 1
6	Jäähdytysnesteen paluuputki
7	Jäähdytysnesteen tuloputki
8	Lambdatunnistin 1
9	Lambdatunnistin 2
10	Hukkaportin tanko
11	Katalysaattori 1
12	Katalysaattori 2

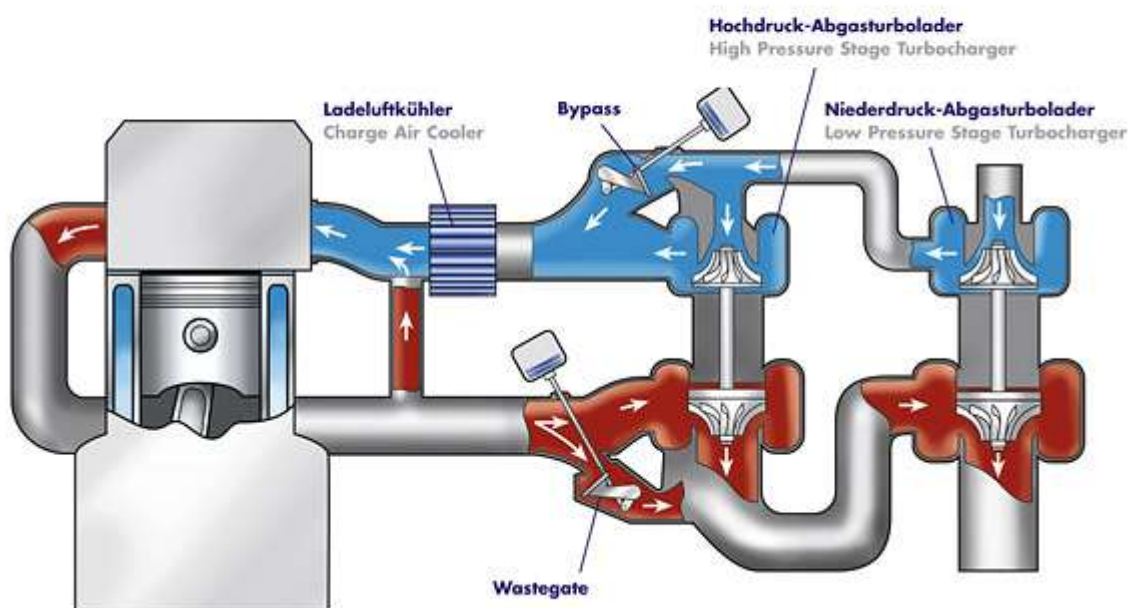
2.6 Ahtopaineen hallinta

Täyskuormitustilanteessa N54-moottori toimii 0,8 bar ylipaineella. N54-moottorissa ilmanohitusventtiilit aukeavat paine-eron saavuttaessa arvon 0,3 bar. (BMW N54 Engine Management, 15.)

3 VAIHEITTAISAHTAMINEN

3.1 Borg Warner

2-stufige geregelte Aufladung (R2S™) Regulated 2-stage Turbocharging (R2S™)



Kuvio 19. Reguloitu vaiheittaisahdettu järjestelmä. (Borg Warner, [Viitattu 28.5.2011].)

Borg Warnerin reguloidussa kaksivaiheisessa ahdinjärjestelmässä (kuvio 19) on kaksi erikokoista pakokaasuahdinta liitettynä sarjaan. Ahtimien ohjaukseen käytetään ohitusventtiileitä. Sylinteriltä tuleva pakokaasun massavirta virtaa ensin pakosarjaan, tästä pakokaasu jatkaa matkaansa korkeapaineiselle ahtimelle tai sitä ohjataan osittain ohitusventtiilin avulla matalapaineisen ahtimen turbiinille. Tämän jälkeen koko virtaus on matalapaineisen turbiinin käytössä. (Borg Warner.)

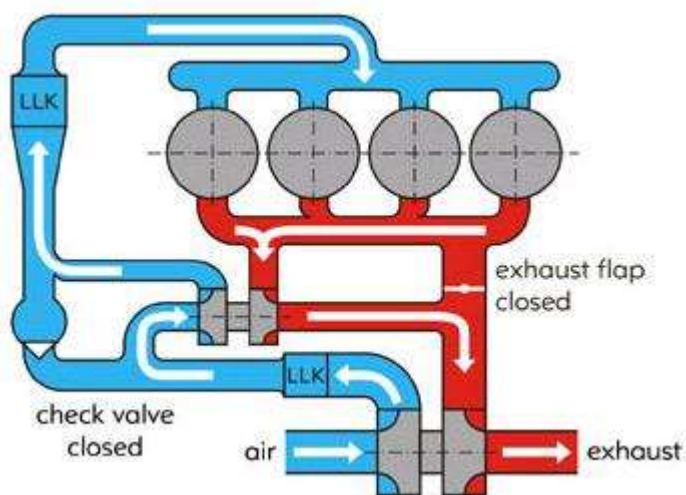
Ilmuilma on ensin ahdettu matalapainetasolla. Korkeapainetaso ahdtaa ilmaa tämän jälkeen vielä enemmän, jonka jälkeen ilma kulkee välijäähdyttimen kautta.

Esihtamisprosessin ansiosta korkeapaineasteen pienikokoinen kompressori pystyy saavuttamaan korkean paineasteen ja pystyy tuottamaan tarpeellisen määrän ilmaa järjestelmään. (Borg Warner.)

Matalilla kuormituksilla ja käyttö kierroksilla eli pakokaasuvirtauksen ollessa vähäinen on ohitusventtiili täysin suljettu ja koko pakokaasuvirtaus kulkee korkeapaineahtimen turbiinin lävitse. Tämä johtaa nopeasti korkeaan paineen nousuun. Moottorin käyntinopeuden kasvaessa siirtyy pakokaasuvirtaus portaattomasti matalapaineahtimen turbiinille ohitusventtiilin avautuessa. Reguloitu vaiheittaisahtaminen täten sallii jatkuvan adaptaation käyttötilanteen mukaan. (Borg Warner.)

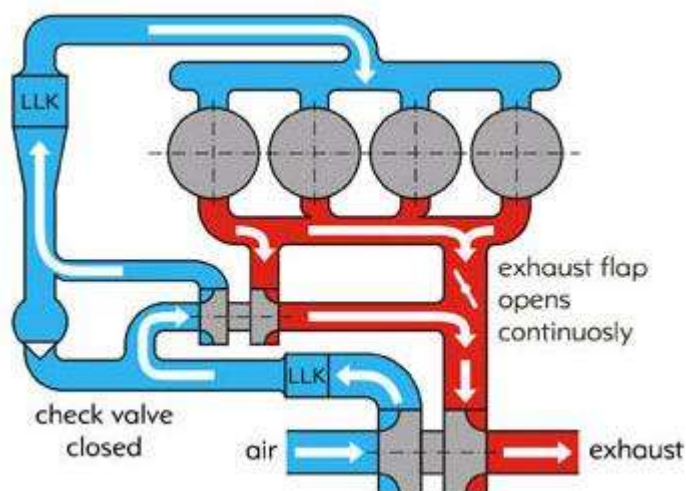
Järjestelmää voidaan säätää pneumaattisten ohitusventtiilien avulla, samalla tavoin kuin muuttuvilla siivillä varustettujen ahtimien käytössä. Tällöin on mahdollista mallintaa toimiva ahdinjärjestelmä joka täyttää vääntömomentti- ja tehotarpeet kunkin tilanteen mukaan. (Borg Warner.)

3.2 Opel Twinturbo



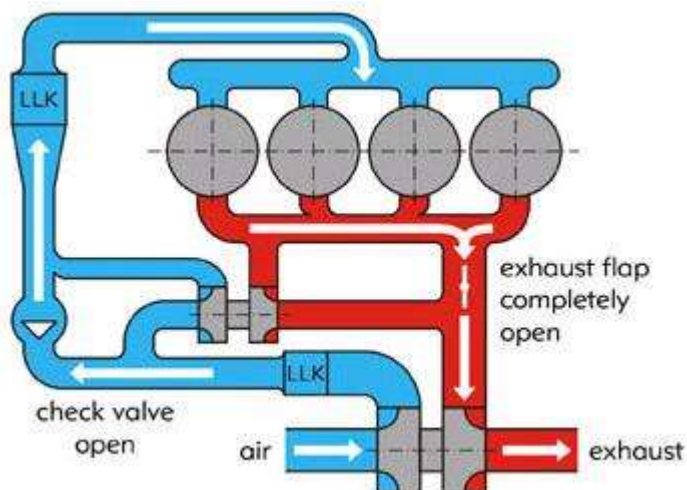
Kuvio 20. Pyörintänopeus alle 1800 1/min. (Opel Twinturbo, [Viitattu 28.5.2011].)

General Motorsin käyttämä vaiheittaisahdettu ahdinjärjestelmä eroaa hieman Borg Warnerin kehittämästä vaiheittaisesta ahdinjärjestelmästä. Moottorin pyörintänopeuden ollessa alle 1800 1/min (Kuvio 20), eli matalilla kierrosnopeuksilla pakopuolen läppä on suljettuna ja pakokaasu kokonaisuudessaan ohjataan korkeapaineiselle ahtimelle, joka huolehtii tässä vaiheessa yksin ahtopaineen tuotosta. Suurempikokoinen, matalapaineahdin toimii tyhjäkäyntinopeudellaan eikä ahda imuilmaa. (Opel Twinturbo.)



Kuvio 21. Kierrosalueella 1800-3000 1/min. (Opel Twinturbo, [Viitattu 28.5.2011].)

Pyörintänopeuksilla 1800-3000 1/min (Kuvio 21) suurikokoisempi ahdin otetaan toimintaan mukaan ja ahtimet toimivat nyt yhtäaikaan. Kuormituksesta riippuen pakokaasuläppä aukeaa syöttäen pakokaasua molemmille ahtimille. Suurempi ahdin esiahtaa ilman jonka välijäähdytyn sitten viilentää. Ahtimen ohitusventtiili on suljettuna, koska suuren ahtimen paine ei ylitä pienemmän ahtimen painetta. (Opel Twinturbo.)



Kuvio 22. Pyörintänopeus yli 3000 1/min. (Opel Twinturbo, [Viitattu 28.5.2011].)

Pyörintänopeuksissa yli 3000 1/min (Kuvio 23) vain suurikokoisempi ahdin ahtaa ilmaa näillä kierrosnopeuksilla, koska sen läpi pystytään ohjaamaan enemmän ilmaa kuin pienikokoisen korkeapaineahtimen lävitse. Pakokaasuläppä on nyt täysin auki ja pakokaasu kokonaisuudessaan virtaa suuremman ahtimen turbiinin lävitse. Ahtimen ohitusventtiili on nyt auki, jolloin suuren ahtimen tuottama ahtoilma yksin menee moottorin imusarjalle. (Opel Twinturbo.)

4 PÄÄTELMÄT

Työn tarkoituksena oli selvittää ahtimen rakennetta ja ahdinjärjestelmän toimintaa yksityiskohtaisesti, mutta myös siten että asiaan perehtymätönkin saa hyvän kuvan toiminnasta ja miksi tällaisia järjestelmiä käytetään. Laskelmilla pyrittiin hakemaan syvyyttä aiheeseen ja opastamaan ahdinvalinnoissa.

Ahdinjärjestelmien käytön ja moottoritehojen pienenemisen henkilöautoissa yleistyessä onkin hyvä tietää tästä ilmiöstä syvemmin. Moottoreiden litratehot nousevat ja ahtimien lukumäärä lisääntyy kahteen, mikä tuo omat haasteensa myös huolto- ja korjaamotoiminnalle. Tällöin riittävä perustietämys ja mahdollinen lisäkoulutus henkilökunnalle on paikallaan riittävän tietotaidon aikaansaamiseksi. Rinnakkaisahtamisessa suurena etuna on moottorin käytöksen ja auton ajettavuuden parantuminen. Ahtimien avulla parannetaan myös kulutus- ja päästölukemia, tehoa ja vääntöä unohtamatta. Suuret tehot laajemmalla alueella luovat mielekkäämmän ajokokemuksen ja välittömän voiman käytettävyyden ja vanhoista ahdetuista autoista tuttua turboviivettä ei enää juurikaan ole. Kaksoisahtamisen etuna voidaan pitää myös sen perustumista ennestään olemassa oleviin komponentteihin. Ahtimia on ollut autoissa erisuuruisina autoissa jo kauan ja putkitukset on helppo ja edullinen tehdä. Pakokaasuahdimilla toimivia kahden ahtimen konstruktioita ei markkinoille ole pelkästään tullut, vaan esimerkiksi VAG-yhtymä luottaa mekaanisen ahtimen ja pakokaasuahtimen vaiheittaiseen käyttöön lisävoiman tuottamiseen henkilöautoissaan. Rinnanahntamisen tuomat mahdollisuudet ovatkin vieneet vapaastihengittäviltä moottoreilta yhä enemmän markkinoita, samalla kulutuksella kun saadaan huomattavasti suurempia moottoritehoja.

Työtä hankaloitti hieman luotettavan materiaalin suppea saatavuus. Itse ahtimista materiaalia kyllä löytyi paljon, mutta ahtimiin keskittyneiden yritystenkään kautta ei rinnakkaisahtamisesta saanut koulutusmateriaalia. Tehtaiden materiaalia internetistä ja painettua materiaalia kirjastosta löytyikin riittävässä määrin perusteellisen etsimisen jälkeen, vaikkakin englanninkielisenä, mikä osaltaan hidasti käännöstöineen kirjoitusprosessin etenemistä.

LÄHTEET

- Bauer, H. 2002. Autoteknillinen taskukirja. Suomentaja Heikki Haapaniemi. Jyväskylä: Autoalan Koulutuskeskus Oy.
- Bell, A. G. 1988. Modern engine tuning. Suomentaja Esko Mano. Helsinki: Teekkarien Autopalvelu Oy.
- Bell, C. 1997. Maximum boost: Designing, Testing and Installing Turbocharger Systems. Bentley Publishers.
- Borg Warner Turbo Systems. Ei päiväystä. [www-dokumentti]. [Viitattu 28.5.2011]. Saatavissa <http://www.turbos.bwauto.com/products/r2s.aspx>
- BMW N54 Engine Introduction. 18.8.2006. Saatavissa: <http://www.e90post.com/forums/showthread.php?t=38856>
- BMW N54 Engine Management. 18.8.2006. Saatavissa: <http://www.e90post.com/forums/showthread.php?t=38856>
- BMW N54 Engine Mechanical. 18.8.2006. Saatavissa: <http://www.e90post.com/forums/showthread.php?t=38856>
- BMW N54 Engine Technology. 18.8.2006. Saatavissa: <http://www.e90post.com/forums/showthread.php?t=38856>
- Hiereth, H. & Prenninger P. 2003. Charging the internal combustion engine, Powertrain. Itävalta: Springer-Verlag 003
- Mitsubishi Club Finland. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. [Viitattu 24.4.2011]. Saatavissa: <http://www.mitsubishiclubfinland.com/temp/turbokartat/td06h-20g-cfm.gif>
- Opel Corsa Turbo Dragster. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. [Viitattu 31.5.2011]. Saatavissa: <http://members.fortunecity.com/entapryz/OpelCorsa/id14.html>
- Opel Twinturbo. [Verkkosivu]. Ei päiväystä. [Viitattu 28.5.2011]. Saatavissa: http://www.automotorsport.se/bigpix/2007/opel_twinturbo_skiss_stor.jpg
- Saab 9-5. [Verkkosivu]. Ei päiväystä. [Viitattu 28.5.2011]. Saatavissa: http://194.18.30.201/www/saabfinlandnew/lehdistotiedotteet/nyheter/95_2001/0141.html
- Stealth 316. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. [Viitattu 27.4.2011]. Saatavissa: <http://www.stealth216.com/images/td04h-16t-cfm.gif>

Tin can tuners. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. [Viitattu 24.4.2011]. Saatavissa:
<http://www.tincantuners.net/images/ar-suhde.jpg>

Toyota Service Training: Turboahtimet ja kompressorit, Jakso 3.

Turbo Tech 101. 8.12.2006. [Verkkosivu]. Morristown: Honeywell International Inc.
[Viitattu 13.3.2011]. Saatavissa:
http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/tech_center/turbo_tech101.html

Turbo Tech 103. 08.12.2006. [Verkkosivu]. Morristown: Honeywell International
Inc. [Viitattu 13.3.2011]. Saatavissa:
http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/tech_center/turbo_tech103.html

VW Tsi. Ei päiväystä. [Verkkosivu]. [Viitattu 31.5.2011]. Saatavissa:
http://www.greencarcongress.com/2005/08/inside_vws_new_.html