



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

MATERJALITEHNIKA INSTITUUT
Materjaliõpetuse õppetool

MTM40LT

Reio Rada

**FORD FIESTA R5 JAHUTUSVENTILAATORI
PURUNEMISE PÕHJUSTE UURIMINE MATERJALI
SEISUKOHALT**

Autor taotleb tehnikateaduste bakalaureuse akadeemilist kraadi

Tallinn 2014

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”.....2014.a. Töö autor.....allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele “.....”.....2014.a.

Juhendaja.....allkiri

Lubatud kaitsmisele

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”.....2014.a.

.....allkiri

TTÜ materjalitehnika instituut
Materjaliõpetuse õppetool
BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE
2014 õppeaasta kevadsemester

Üliõpilane: Reio Rada
Õppekava: Tootearendus ja tootmistehnika MATB
Eriala: Tootearendus ja tootmistehnika MATB
Juhendaja: Aare Aruniit, insener

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

Ford Fiesta R5 jahutusventilaatori purunemise põhjuste uurimine materjali seisukohalt
Finding the reasons behind the breakage of a Ford Fiesta R5 cooling fan from the material perspective

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Uurida teadus- ja õppekirjandusest erinevate termoplastide tüüpide, nende kasutuse ja vastupidavuse kohta.	27.04.2014
2.	Refereerida lõputöö teoreetilise osa jaoks järgmiseid teemasid: plastide ajalugu, lühituvustus, polüamiidi siseehitus, plastide purunemine	04.05.2014
3.	Viia läbi katsed erinevate jahutusventilaatoritega.	09.05.2014
4.	Teha järeldus materjalide erinevusest ning nende mõjust ventilaatori purunemisele.	14.05.2014
5.	Leida ventilaatori purunemise põhjus.	16.05.2014
6.	Esitada lõputöö valmiskujul juhendajale ülevaatamiseks.	19.05.2014

Töö keel: eesti keel

Töö esitamise tähtaeg:

Üliõpilane Reio Rada /allkiri/ kuupäev.....
Juhendaja Aare Aruniit /allkiri/ kuupäev.....

SISUKORD

SISUKORD	4
EESSÕNA	5
SISSEJUHATUS	6
1 MATERJAL JA SELLE ISEÄRASUSED	8
1.1 PLASTIDE JA POLÜMEERIDE AJALUGU.....	8
1.2 PLASTIDE LÜHITUTVUSTUS.....	8
1.2.1 <i>Plastide liigitus</i>	9
1.2.2 <i>Plastide omadused</i>	10
1.2.3 <i>Plastide tootmine</i>	11
1.3 POLÜAMIIDI SISEEHITUS	13
1.4 PLASTIDE PURUNEMINE	14
1.4.1 <i>Temperatuuri mõju</i>	14
1.4.2 <i>Füüsikalised-keemilised omadused</i>	15
1.4.3 <i>Tehnoloogilised omadused</i>	15
1.4.4 <i>Ekspluatatsiooni mõju</i>	15
2 JAHUTUSVENTILAATORI PURUNEMISE UURIMINE	17
2.1 PURUNEMISPINNA JA VENTILAATORI VISUAALNE UURING	17
2.2 KÕVADUS	21
2.2.1 <i>Katsetulemused</i>	22
2.2.2 <i>Katsetulemuste järelendus</i>	23
3 ETTEPANEKUD VENTILAATORI PARENDUSEKS	24
3.1 VENTILAATORI DISAINI MUUTMINE	25
3.2 UUE MATERJALI VALIK	29
3.3 TOOTMISPROTSESSI TÄIUSTAMINE.....	29
KOKKUVÕTE	30
SUMMARY	31
KASUTATUD KIRJANDUS	32
LISAD:	34
LISA NR 1: FIESTA R5 TECHNICAL BULLETIN 19 - COOLING PACKAGE CLEARANCE.....	34
LISA NR 2: FORD FIESTA R5 HOMOLOGEERINGU VÄLJAVÕTE	36
LISA NR 3: FORD FIESTA R5 ORIGINAAL JAHUTUSVENTILAATORI JOONIS	37
LISA NR 4: FORD FIESTA R5 RÕNGAGA JAHUTUSVENTILAATORI JOONIS.....	38

EESSÕNA

Käesolev bakalaureusetöö on teostatud OÜ Triple M initsiatiivil. Töö eesmärk on selgitada Ford Fiesta R5 jahutusventilaatori purunemise tagamaid. Loodetavasti on tööst abi vältimaks edasisi ebaõnnestumisi tulevastel rallidel Fiesta R5-ga.

Töö autor soovib tänada Juss Rodenit (OÜ Triple M) lõputöö teema, algandmete ja uuritavate objektide hankimiste eest, Aare Aruniitu (Tallinna Tehnikaülikool) juhendamise ja õpetamise eest, Chris Williamsit (M-Sport) alginfo ja täpsustuste eest, Mart Saarnat, Fjodor Sergejevit ja Renno Veinthali (Tallinna Tehnikaülikool) vastutulelikkuse eest. Lisaks soovib autor tänada Liisa Kurisood.

SISSEJUHATUS

Ford Fiesta R5 on ralliauto mille on ehitatud pika ja kuulsusrikka ajaloo Suurbritannia ettevõtte M-Sport. Fiesta R5 sündis 2013. aastal ning tänaseks on toodetud üle 50 auto mis võitlevad kõrgete kohtade nimel üle terve maailma. Auto on hästi vastu võetud ja laialdaselt kasutusel oma madala hinna,



Sele 0.1: Ford Fiesta R5

~200 000 €, ja muidugi kiiruse tõttu. Tegu peaks olema üsna lihtsa ja töökindla autoga kuid hiljaaegu on tekkinud tal üks tüüpiga – auto jahutusventilaator puruneb ilma erilise põhjuseta.



Sele 0.2: Uuritavad jahutusventilaatorid

Antud lõputöö eesmärk on uurida jahutusventilaatori purunemise põhjuseid materjali seisukohalt ning pakkuda välja parandusi selle vältimiseks.

Praeguseks on ventilaatori purunemisi olnud M-Spordi sõnul vähemalt viis. Täpne arv on teadmata, sest kõikidest juhtumistest M-Spordile teada ei anta. Tähele peaks panema, et autol on kaks jahutusventilaatorit, kuid purunenud on neist ainult parempoolne. M-Spordi sõnul on see aga tõenäoliselt lihtsalt kokkusattumus kuna parempoolne ventilaator on kasutusel tihedamini (vasakpoolne läheb tööle ainult erijuhtudel). Kuigi ralliauto saab kiiruskatsetel suuri löökoormusi, ei saa sisekaamera videote analüüsi tulemusel väita, et need koormused oleksid olnud tavapärasest kõrgemad. M-Sport on tänaseks andnud välja bulletääni kus soovitatakse jahutusventilaator viia tuulekojas paiknevast vaheseinast 8 mm kaugusele (vt Lisa 1). Nimelt arvatakse purunemise põhjuseks olevat just liigne ventilaatori laba läbipaindumine kuni tekib kontakt eelnimetatud vaheseinaga. Kahjuks on aga teada veel üks purunemine, mis on juhtunud peale bulletääni avaldamist. [11]

Jahutusventilaatori tootjaks on SPAL. Toote nimi on VA03-AP90/LL-68A (ventilaator + sammootor + korpus). Ventilaator ise on valmistatud PA66-GF33 plastist. Ventilaator ei ole toodetud spetsiaalselt Ford Fiesta R5-le. [13]

1 MATERJAL JA SELLE ISEÄRASUSED

Järgnev peatükk annab lühiülevaate polümeeride ajaloost, liigitusest, omadustest, tootmisprotsessidest ja sisestruktuurist. Kuna käesolev lõputöö on suunatud Ford Fiesta R5 jahutusventilaatori uurimisele, on peatükis keskendunud põhiliselt termoplastidele.

1.1 Plastide ja polümeeride ajalugu

Sõna „polümeer“ võttis esmakordselt kasutusele rootsi keemik Jöns Jakob Berzelius. Esimese sünteetilise polümeeri võtsid praeguse seisuga kasutusele mesoameeriklased, kes tegid lateksist kummi, segades seda taimemahlaga. Plastikute ajastule pani alguse belgia keemik Leo Baekeland, kes esitles 1909. aastal esimest sünteetiliselt polümeeril põhinevat polümeermaterjali nimega bakeliit, mis võeti ka laialdaselt kasutusele. Vaatamata sellele oli polümeeride struktuurist arusaam üsna kehv. Üle kümne aasta hiljem pakkus Hermann Staudinger et polümeerid koosnevad molekulide ahelaist, võttes kasutusele makromolekuli mõiste. 1930ndatest alates on polümeeriteaduse areng olnud tormiline. [1]

Polüamiidi tutvustas maailmale 1930ndatel Wallace Hume Carothersi töö põhjal DuPont. [2]

1.2 Plastide lühitutvustus

Plastid on polümeermaterjalid, mis sisaldavad endas lisaks polümeerile ka lisandeid, millega mitmekesistatakse polümeeride omadusi. Põhilisteks lisanditeks on plastifikaatorid, täiteained, stabilisaatorid ja värvained.

Plaste kasutatakse enamasti nende töödeldavuse, kerguse, korrosioonikindluse, eritugevuse, mürasummutuse ja elektriisolatsiooni tõttu.

1.2.1 Plastide liigitus

Plastid liigitatakse temperatuurile reageerimise järgi termoreaktiivideks ja termoplastideks.

- Termoreaktiivide kuumutamisel muutuvad nad ruumilise struktuuriga võrestik-polümeerideks mis ei sula ega lahustu.
Termoreaktiivid on näiteks epoksüvaik (EP), polüestervaik, fenoolformaldehüüdvaik (PF), aminoplastid (UF, MF).
- Termoplastid muutuvad tänu lineaarsele struktuurile seevastu aga voolavaks, kuid jahtumisel taastuvad nende esialgsed omadused.
Termoreaktiivid on näiteks polüetüleen (PE, polüpropüleen (PP), fluorplast (PTFE), polüstüreen (PS), polüvinüülkloriid (PVC), polümetüülmetakrülaat (PMMA), polüamiid (PA), polükarbonaat (PC) jne. [3]

Otstarbe järgi liigitatakse plastid:

- konstruktsiooniplastideks
 - polüamiid (PA)
 - polükarbonaat (PC)
 - epoksüvaik/epoksüplast (EP)
 - polümetüülmetakrülaat/orgklaas (PMMA)
- tarbeplastideks
 - polüetüleen (PE)
 - polüpropüleen (PP)
 - polüvinüülkloriid (PV),
 - fenoolformaldehüüdvaik/fenoplast (PF)
 - polüstüreen (PS)
- eriplastideks
 - polütetrafluoroetüleen/fluorplast (PTFE)
 - polüfenüleensulfiid (PPS)
 - polüeeter-eeterketoon (PEEK)
 - polüvinüülideenfluoriid (PVDF)
 - polüamiid (PI)
 - polübensimidiasool (PBI) [4]

1.2.2 Plastide omadused

Plastist toodete talitlusomadused on:

- tehnoloogilised (määravad plastide töödeldavuse)
 - sulaviskoossus
 - termostabiilsus
 - niiskusesisaldus
 - kahanemine
- füüsikalised ja keemilised
 - sooja-/külmakindlus, tulekindlus
 - soojusjuhtivus
 - soojuspaisumine
 - barjääromadused
 - veeimavus
 - optilised omadused (läbipaistvus, valguse neeldumine/peegeldumine)
 - degradatsioon
- mehaanilised
 - deformatsioon
 - viskoelastsus
 - dünaamiline koormus
 - kõvadus
 - kulumiskindlus [4]

1.2.3 Plastide tootmine

Plastide tootmine sõltub eelkõige plasti tüübist ja toote konstruktsioonist. Termoplaste peamiselt valatakse, vormitakse ja töödeldakse ekstruuderiga. Termoplaste on võimalik ka keevitada. Termoreaktiive pressitakse, valatakse ning vormitakse. Neile lisandub veel löiketöötlus. Plastide tootmine koosneb üldjuhul kuumutamise pehmenemiseni, vormimisest, jahutamisest tardumiseni ning toote eraldamisest vormist. [5]

1.2.3.1 Pressvormimine

Pressimise korral viiakse materjal kuumutamise ja rõhu toimele plastsesse olekusse ja temaga täidetakse terve vorm.

Pressimismeetoditeks on:

- otsepressimine
 - külmpressimine $T < 170^{\circ}\text{C}; p < 45 \text{ MPa}$
 - kuumpressimine $T > 170^{\circ}\text{C}; p > 45 \text{ MPa}$
- valupressimine $T = 170 - 200^{\circ}\text{C}; p = 15 - 75 \text{ MPa}$ [4]

1.2.3.2 Survevalu

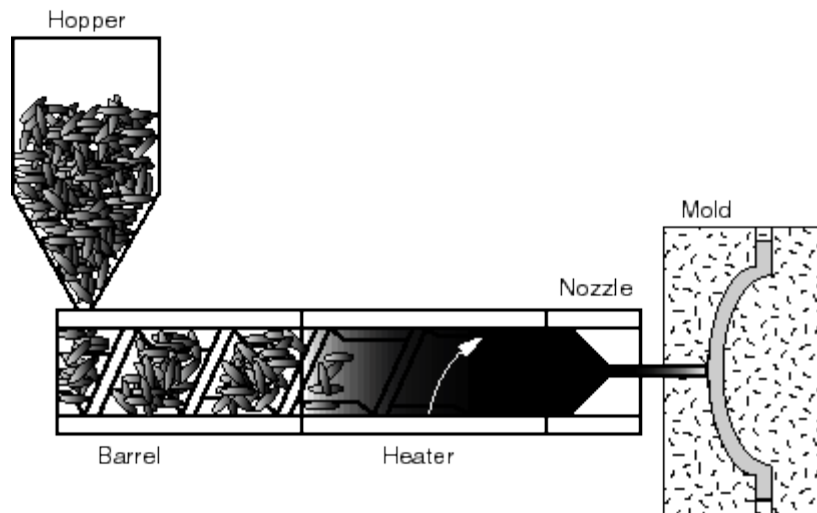
Survevalu võimaldab valmistada keerulise kujuga tooteid. Survevalu puhul segatakse materjal tiguajamiga masinas, täidetakse vorm sulamaterjaliga ning surutakse see vormi.

Termoplastide valamisel kuumutatakse materjal 100-300 °C ja viiakse rõhuni 57-400 MPa. Vorm ise on enamasti 30-90 °C temperatuuri juures.

Termoreaktiive saab ka survetöödelda, sest lühikese aja jooksul käituvad termoreaktiivid nagu termoplastid. Termoreaktiivide puhul on materjal ja rõhk väiksemad – 80-95 °C ja 100-200 MPa, vormi temperatuur on 140-180 °C. Termoreaktiivid kõvenevad vormis toimivate reaktsioonide kaudu.

Survevalu puhul on põhiliseks probleemiks vormi ühtlane ja tihe täitmine. Materjali liigkiire jahtumine toob endaga kaasa pinna kehva kvaliteedi ning jätab materjalile sisepinged mis põhjustavad toote kuju moonustumise ja pragunemise.

Survevalu saab ka mitmekesisendada kasutades korraga mitmeid materjale või muutes valu ajal vormi kuju. [4, 5, 7]



Sele 1.1: Survevalu tootmisprotsess [12]

1.2.3.3 Rotatsioonvormimine

Rotatsioonvormimist kasutatakse õõnsate toodete vormimiseks pulbrilistest polümeeridest (HDPE, PA, PP, PVC, PC jt). Vormi pöörlemisel materjal sulatatakse ning seejärel paagutatakse vormi sisepinnale, kus ta jälle jahutatakse.

Rotatsioonvormimise eelisteks on vormi lihtsus ning hea pingete relaksatsioon, kuid selle eest on tootlikkus madal. [4]

1.2.3.4 Polümeeride töötlemine

Polümeere töödeldakse sulanud kujul, mis tähendab et materjal on voolav. Polümeeride voolamine on aga iseenesest üpris keeruline. Nimelt toimub materjalis tema vormimisel pidev makromolekulide omavaheline hargnemine, asukoha muutus jne. Pärast vormimist materjal stabiliseerub. Kristallilistel plastidel (PA, PP, PE) on jahtumisel suurem kokkutõmbumine, ning kiirel jahutamisel võib osa materjalist jääda nõ „tühjaks.“ Kristallatsiooni vältimiseks kasutatakse lõõmutamist. Kui tootesse jäävad jääkpinged, võib toode kõverduda, kuid halvemal juhul ka puruneda. Jääkpingeid tekib rohkem kõveratesse pindadesse. [5]

1.3 Polüamiidi siseehitus

Polüamiididel on painduva ahelaga kristalliline (35..50%) struktuur. PA66 sulamistemperatuur on 265°C. Teda kasutatakse oma heade mehaaniliste omaduste tõttu konstruktsiooniplastina.

Mõned PA66 omadused:

- elastsusmoodul E 1,6..3,8 GPa
- tõmbedeformatsioon ϵ 80..300%
- tõmbetugevus σ 76..94 MPa
- voolavuspiir 45..83 MPa
- pikenemine purunemisel ~5%
- Izod' löögisitkus 43..110 J/m
- sitked
- hea vastupanu löökidele
- abrasioonikindlad
- töötemperatuur -30...110°C
- ilmastikukindlad
- läbipaindetemperatuur 100°C 1,85 MPa juures
230°C 0,45 MPa juures [5, 7]

Polüamiide on lihtne töödelda tänu madalale sulaviskoossusele. Töötlemine toimub enamasti vahemikus 260..320°C, ehk siis pisut üle sulamistemperatuuri. Oluline on aga enne töötlemist segu kuivatada mahukahanemise tõttu, mis võib polüamiididel ulatuda üle 2%. Polüamiidide omadused sõltuvad palju materjali veesisaldusest. [5, 6, 7]

Uuritava jahutusventilaatori plasti mark on PA66-GF33. Lahtiseletatuna tähendab see:

PA66-GF33 – polüamiid

PA**6**6-GF33 – diamiinist tulnud süsinikuaatomite arv

PA**6**6-GF33 – dihappest tulnud süsinikuaatomite arv

PA66-**GF**33 – klaaskiuga tugevdatud

PA66-GF**33** – klaaskiu protsendiline sisaldus

Tänu klaaskiule muutuvad plasti omadused märkimisväärselt:

$E - 10..11 \text{ GPa}$

$\varepsilon - \sim 5\%$

$\sigma - 160..210 \text{ MPa [6]}$

1.4 Plastide purunemine

Polümeerid on võrreldes metallidega oluliselt nõrgemad, ning vastavalt plasti liigile, on ka nende käitumine jõu mõjul erinev.

Vastupanu plastide purunemisele määrab

- keskkond
- deformatsiooni kuju
- valmistamise tehnoloogia

Plastide purunemisel on kaks äärmust:

- rabe – deformatsioon on väike. Materjal puruneb enne voolamispiirini jõudmist, purunemispind on sile. Purunemine toimub järsku.
- veniv/sitke – elastsuspiiri ületamisel tekivad materjali mõrad ning ta hakkab venima kuni puruneb. Purunemispind on krobeline. Sitkuse määrab materjali deformatsioonivõime.

Enamikel purunemistest on tegu nende kahe kombinatsiooniga ning sõltub materjali kontaktpinna suurusel, toote geometriast, deformatsioonikiirusest jne. [5, 7]

1.4.1 Temperatuuri mõju

Väga suur osa plasti deformatsiooni kujul on temperatuuril. Kui temperatuur on madal, käitub plast hapralt (madalam sitkus), st toode puruneb juba väikese deformatsiooni mõjul ja seda järsult. Kui aga temperatuur on kõrge, on olukord vastupidine – plast muutub voolavamaks ning paindub rohkem läbi.

1.4.2 Füüsikalised-keemilised omadused

Löögitugevus iseloomustab materjali sitkust. Mida suurem deformatsioonikiirus, seda hapramalt plast käitub, st seda väiksem on materjali sitkus. Seega peavad plastid löökoormustele vastu kehvemini kui aeglaselt mõjuvatele jõududele. Vastupanu löökidele saab plastidel tõsta erinevate lisanditega mis tõstavad materjali elastsust. [7]

Praktikas on enamus polümeerid ka viskoelastsed. See tähendab, et kiire deformatsiooni korral plast venib, kuid deformatsiooni lõppedes ei taasta plast enam lõpuni oma kuju, st plast on elastselt ehk pöördumatult deformeerunud. [7]

Kõik polümeerid imavad endasse vett. See aga tähendab, et ajapikku nende omadused muutuvad ning toodete kasutamisel tuleb arvestada ka keskkonnaga. [7]

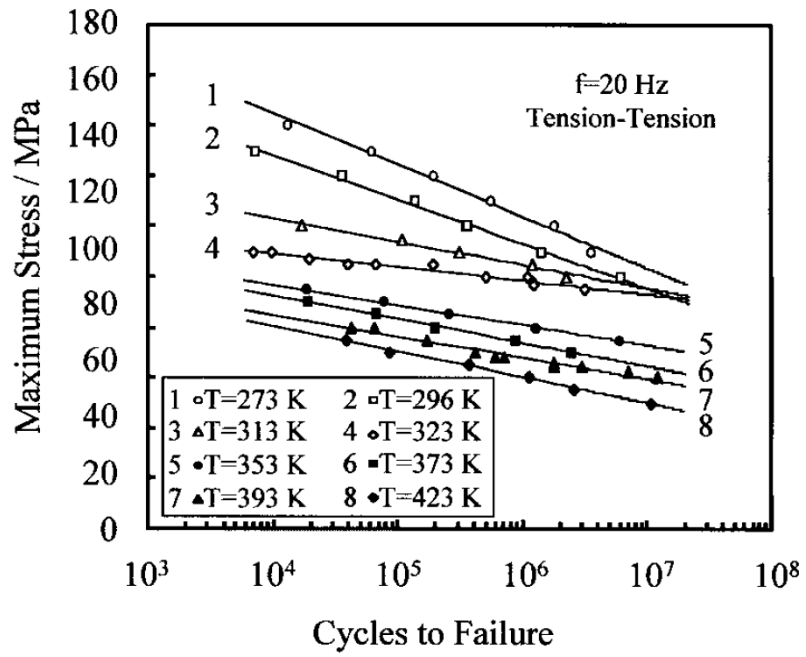
1.4.3 Tehnoloogilised omadused

Plastist toodete valmistamisel võib materjali jääda soovimatuid tühimikke või muid defekte, mis võivad põhjustada materjali soovimatu nõrgenemise.

Plastide tõmbetugevust saab tõsta nende tootmisel kiudude orienteerumisega, kuid kui seda tootmisel mitte jälgida, võib juhtuda et toode ei vasta enam esialgsele spetsifikatsioonile. [7]

1.4.4 Eksploatatsiooni mõju

Väsimus on juht, kui materjal puruneb tugevuspiirist väiksema pinge juures. Pinge ise võib olla aga pikka aega mõjunud. Väsimus tuleneb materjali voolamisest, kusjuures jäigad plastid väsivad kiiremini. Väsimusi on kahte liiki – staatiline ja dünaamiline. Vastupanu dünaamilisele pingele on seejuures väiksem. Väsimusele vastupanu hinnatakse materjali purustavate tsüklite arvuga. [5]



Sele 1.2: PA66-GF väsimuse ja temperatuuri sõltuvus [8]

2 JAHUTUSVENTILAATORI PURUNEMISE UURIMINE

Ventilaatori purunemise uurimiseks on valitud kaks meetodit – purunemispinna uurimine ning materjalide kõvaduste uurimine.

2.1 Purunemispinna ja ventilaatori visuaalne uuring

Purunemispinna uurimisega saab teha järeldusi purunemise põhjustest: kas materjal purunes...

- väsimuse mõjul
- temperatuuri mõjul
- füüsilise mõjuri tõttu

Uuritavaks objektiks on ventilaator, mis purunes 2014. aasta Middle-East Rally Championshipi avaetapil Qatar International Rally'l, Salah Bin Eidan / Nasser Al-Kuwari võistlusautol teise kiiruskatse lõpus.

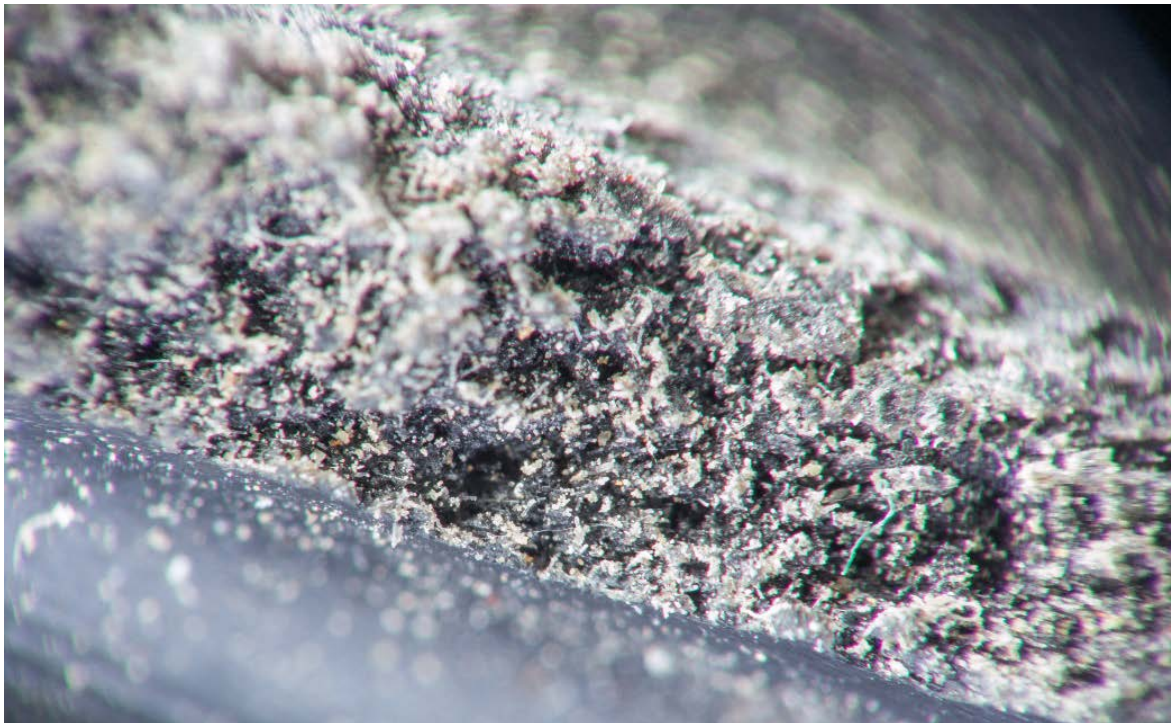


Sele 2.1: Purunenud jahutusventilaator

Õhutemperatuur oli sel hetkel ~30°C. Sisekaamera videost on näha kerge pörutus, kuid rallidel on sellised pörutused üsna tavalised. Löötkoormust otseselt süüdistada ei saa. MM-Motorsport meeskonnal oli käesoleva aasta alguses veel üks taoline juhtum, kus Rally Liepāja'l purunes ventilaator ekipaaži Timmu Kõrge / Erki Pints juhitud autol. See oli antud auto jaoks esimene võistlus, mis toimus vastupidiselt Katari soojale ilmale külmas - temperatuuriks ~0°C. Kuna auto oli Liepājas oma esimesel võistlussõidul ning ventilaator purunes juba ralli neljandal kiiruskatsel, saab väsimuse purunemise põhjusena välistada. Temperatuur on aga keerulisem mõjur. Nimelt ei saa välistemperatuuri järgi veel järeldusi teha, sest kapoti all on temperatuur kõrgem. M-Spordi sõnul ei kasva temperatuur kapoti all üle 100°C. Seega isegi kui temperatuur mootoriruumis oleks olnud maksimaalne, poleks veel ventilaatori materjal voolama hakata saanud. Küll aga muutub materjal elastsemaks. [11]



Sele 2.2: Purunemispind



Sele 2.3: Suurendatud purunemispind

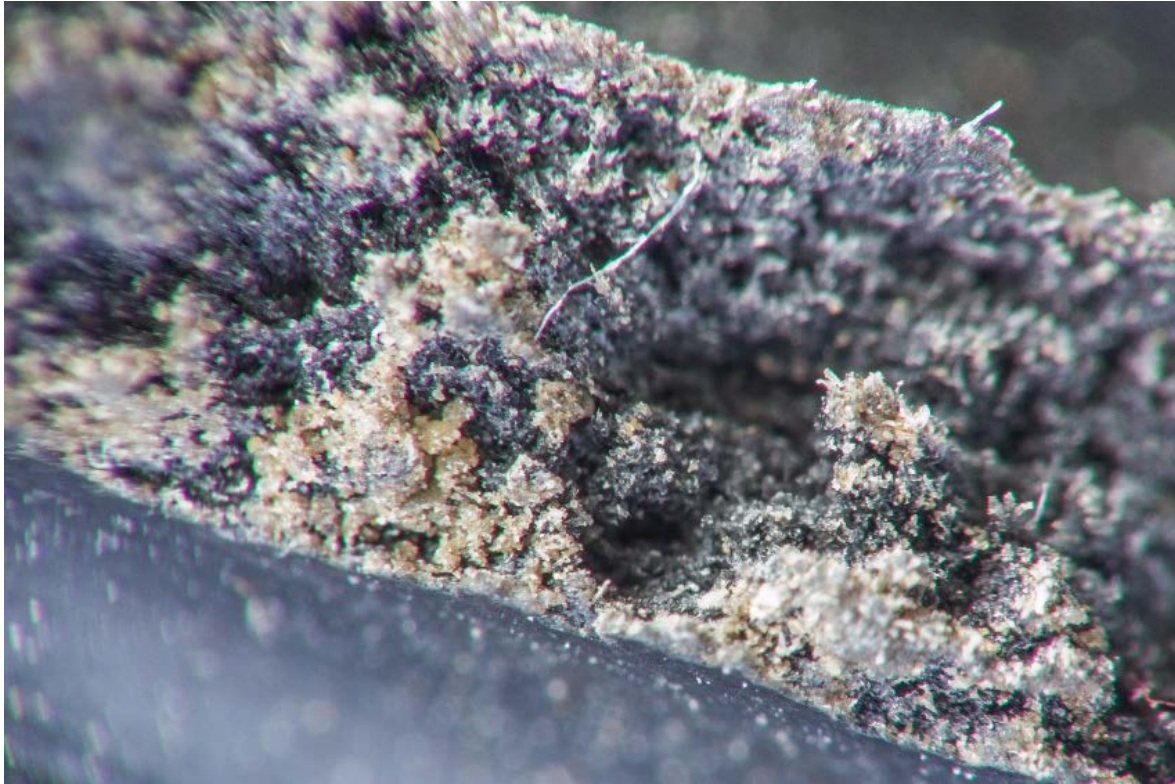
Purunemispinda uurides on näha, et materjal voolama pole hakanud (vt Sele 2.2, 2.3). Purunemine on olnud rabe, ehk materjal on olnud jäik.

Kokkuvõtvalt saab järeldada, et temperatuur materjali purunemisel rolli ei mänginud.

Erinevaid suurendatud fotosid uurides (vt sele 2.4) võib näha, et materjal päris sirgelt ja sujuvalt murdunud pole. Sellest võib järeldada et materjal pole täiesti homogeenne. Taolise purunemise põhjuseks võivad olla mahukahanismisel tekkinud tühimikud.



Sele 2.4: Suurendatud purunemispind



Sele 2.5: Suurendatud purunemispind

Suurendatud fotolt (vt sele 2.5) on näha ka oranž-pruunikaid osasid. Need on polüamiidi graanulite osad, mis on survevalu protsessis jäänud piisavalt sulatamata ning pole seega koos ülejäänud materjali ühtseks kokku sulanud. See näitab viga tootmisprotsessis.

2.2 Kõvadus

Materjali erinevuste avastamiseks on üks kiiremaid ja lihtsamaid katseid materjali kõvaduse mõõtmine. Kõvaduse mõõtmisega saab hinnata materjali pinna tugevust. Materjali kõvadus näitab ära tema võime osutada vastupanu kohalikule deformatsioonile. Materjali surutakse temast suurema kõvadusega materjal ning seejärel hinnatakse jälje suurust ja sügavust. [8]

Antud juhul tehti katsed Rockwelli meetodil, kus jälje mõõtmine nõutav ei ole. Masin surub otsaku materjali kindla jõuga ning seejärel hindab kui sügavale otsak tungis. Sellest järeldub materjali kõvadus.

Katsekehadeks on puhastatud ventilaatorid (vt sele 0.2). Katsekehadele ettevalmistusi teha vaja pole.

2.2.1 Katsetulemused

Esialgu võeti skaalaks pehmete sulamite ja plastide uurimiseks mõeldud HRR skaala.

Skaala	Otsak	Eelkoormus F_0 kgf (N)	Kogu koormus F kgf (N)
HRR	Kuul Ø12,70 mm	10 (98)	60 (588)

Tabel 2.1: HRR skaala

Katsetulemused olid järgnevad:

	Katkine ventilaator	Terve ventilaator
1.	116	110
2.	117,5	113,5
3.	118	112
\bar{x}	117,1	111,6
σ	0,85	1,43

Tabel 2.2: HRR katsete tulemused

Kuna materjalile jäi HRR skaalal pinnale minimaalne märke, korrati katseid HRM skaalal. HRM skaala on samuti mõeldud pehmete sulamite ja plastide testimiseks. Erinevus HRR skaalast on lõppkoormuse ja otsaku suurusel.

Skaala	Otsak	Eelkoormus F_0 kgf (N)	Kogu koormus F kgf (N)
HRM	Kuul Ø6,35 mm	10 (98)	100 (980)

Tabel 2.3: HRM skaala

Katsetulemused olid järgnevad:

	Katkine ventilaator	Terve ventilaator
1.	99	94
2.	98,5	97,5
3.	99,5	95
4.	99	95
5.	99	96
\bar{x}	99	95,5
σ	0,32	1,18

Tabel 2.4: HRM katsete tulemused

Katsetulemusi kontrolliti veel Barcoli meetodil. Barcoli meetod on mõeldud väga pehmete materjalide kõvaduse määramiseks. Kasutusel oli mudel nimega GYZJ 934-1 Katsel surutakse tipunurgaga 26° ja tipuraadiusega 0,157 mm teraskoonus materjali ning hinnatakse selle sissetungimissügavust.

Barcoli meetod andis tulemusteks katkise ventilaatori puhul üpris ebamäärased numbrid, kõikides 4...9 vahel. Terve ventilaatori puhul aga mõõteriist tulemust ei näidanud. Antud tulemused toetavad Rockwelli meetodi tulemusi.

2.2.2 Katsetulemuste järelendus

Kolmest katseseeriast selgub, et terve ehk esialgse materjaliga ventilaator on pehmem. See tähendab, et purunenud ventilaator on hapram ja jäigem kui esialgse materjaliga ventilaator, mis ei purunenud. Sellest järeldub, et jahutusventilaatori laba(d) purunevad hoopis iseene kaalu tõttu, mitte töörežiimis läbivajumisel kokkupuutes vaheseinaga. Kuna ventilaatorid ja nende materjal on töörežiimis koormatud ka pöörlemisel tekkiva inertsjõuga, on nende purunemine löökoormusi saades ka lihtsustatud.

3 ETTEPANEKUD VENTILAATORI PARENDUSEKS

Selge on, et jahutusventilaator läheb katki löökkkoormuste ja tsentrifugaaljõu koosmõjul. Selle vastu võitlemiseks on viis moodust:

1. vähendada löökkkoormusi – kinnitada ventilaator mootori külge näiteks läbi kummipuksi.
2. vähendada tsentrifugaaljõudu – momendil on autol kaks jahutusventilaatorit, mis töötavad erinevatel hetkedel erinevate kiiruste juures. Purunenud on neist parempoolne, mis töötab vasakpoolsest oluliselt tihedamini. Kui ventilaatoreid koormata võrdsemalt, võib see purunemisi vähendada.
3. muuta ventilaatori disaini – on selge, et ventilaatori labad ei kannu enda kaalu. Kui muuta ventilaatori laba paksemaks, muutub laba tugevamaks. Aitab ka koormuse ümber jaotamine.
4. valida ventilaatori jaoks uus materjal – sellise disaini ja koormuste juures on praegune materjal liiga nõrk. Kui materjal asendada tugevamaga, on mure lahendatud.
5. täiustada tootmisprotsessi – suurendatud fotodelt on näha, et tootmisprotsess on olnud puudulik. Tootmisprotsessi täiustamine ja tihedam kontroll aitaks likvideerida tootmisel tekkivad vead.

Esimese lahenduse muudab mitte mõistlikuks sellega kaasnev konstruktsiooni keerukamaks muutumine ning pidev vajadus kummipuksi kontrollida/vahetada tema väsimise tõttu. Teise lahenduse negatiivne mõju on kahe ventilaatori töötamisel sellega kaasnev lisatoite vajadus, mida paraku võistlusautol kunagi ülearu pole. Seega on mõistlik keskenduda ventilaatori disainile, materjalile ning tootmisprotsessi täiustamisele.

3.1 Ventilaatori disaini muutmine

Ventilaatorilaba murrab liigne stress. Järelikult tuleb laba ristlõikel stressi vähendada.

Erinevate disainilahenduste ja neis avalduvate jõudude uurimiseks saab kasutada CAD simulatsioonitarkvara. Ventilaatori mudel on tehtud kasutades 3D projekteerimistarkvara SolidWorks 2014. Simulatsioonid on tehtud ANSYS 14.5 tarkvaraga.

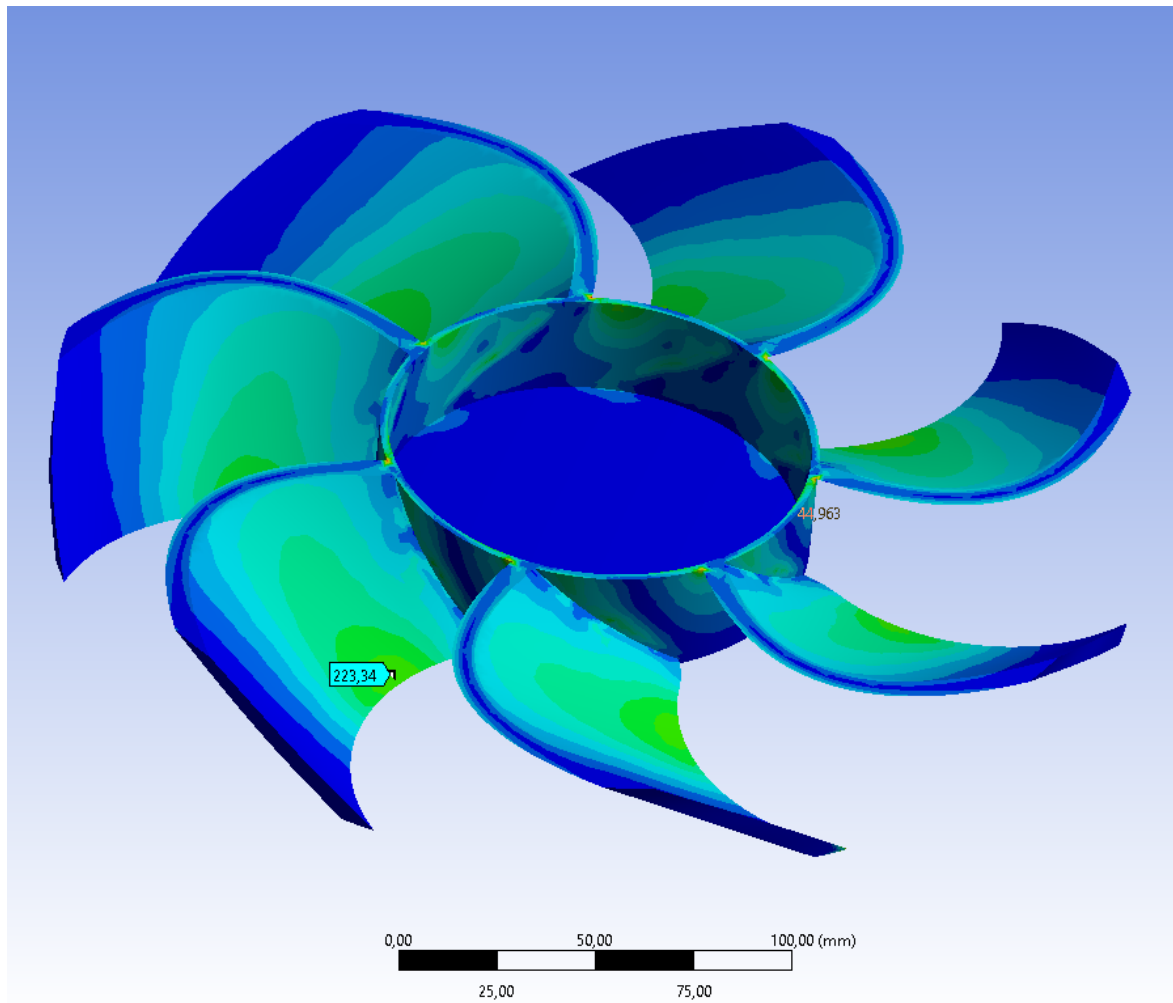
Erinevate disainiparenduste leidmise protseduur on järgmine.

1. Alutuseks tuleb leida ventilaatori labadel stressirohked kohad, sest materjal hakkab just neis kohtades järgi andma. Selleks tuleb määrata esmalt tingimused. Maksimumpööretel töötab ventilaator 4000 RPM, ehk ~ 420 rad/s. Simulatsiooni lihtsustamiseks on lisaks inertskiirendusele määratud viiekordne raskuskiirendus.
2. Teiseks tuleb läbi teha simulatsioon originaalventilaatoriga.
3. Stressirohkete kohtade parandamiseks tuleb läbi viia originaalventilaatori analüüs ning seejärel saab mõelda ventilaatori kuju muutmise peale.
4. Neljandaks tuleb muudetud disainiga läbi teha võrdlussimulatsioon, et välja valida parim lahendus.

Esimese, originaalventilaatori simulatsiooniga saab ühtlasi kontrollida ka simulatsioonimudeli paikapidavust. Simulatsioon näitab enim stressi ventilaatori laba keskelt pisut ventilaatori südame poole. Füüsiliselt reaalselt ventilaatorilaba koormates paindub laba just täpselt selle lõike pealt.

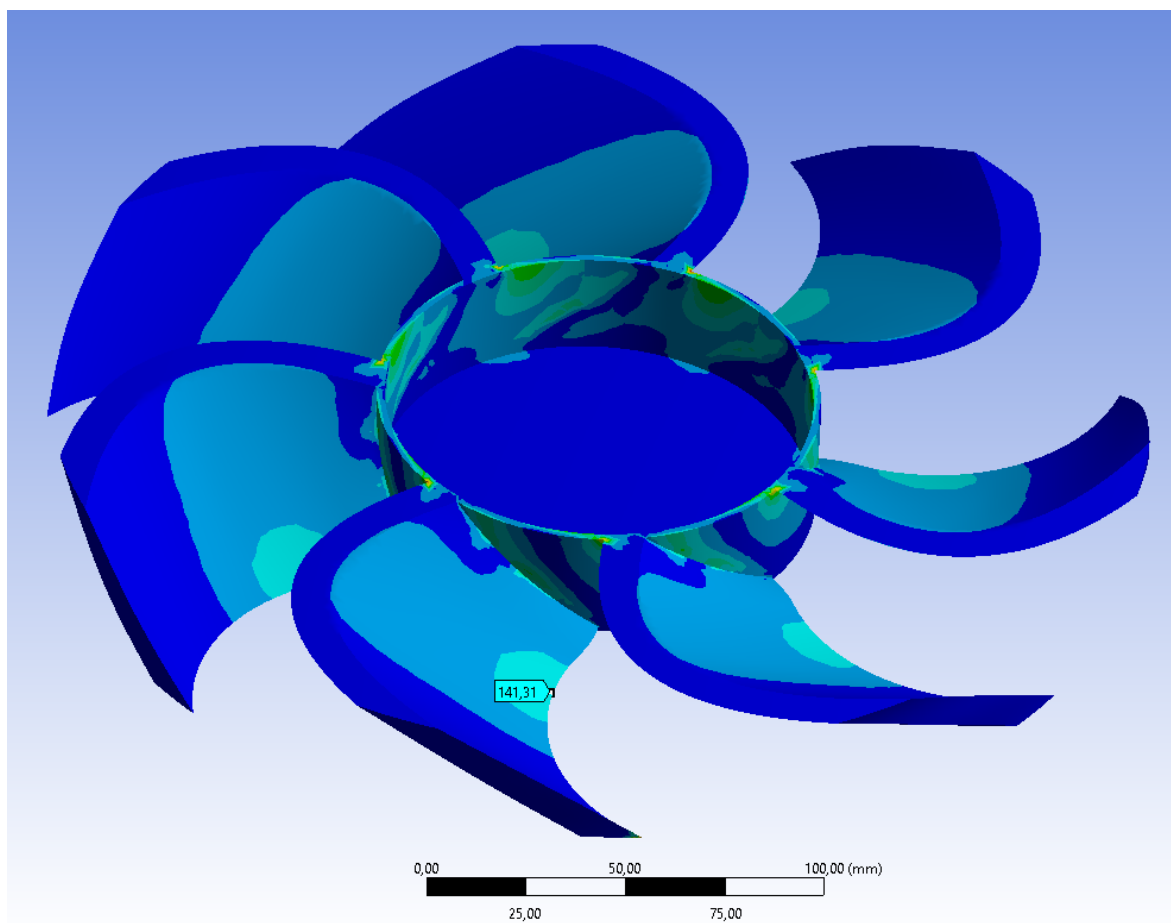
Kuna konkreetse ventilaatori materjali täpsed parameetrid on teadmata, ei saa neid simulatsioonitarkvarra sisestada. Seetõttu ei saa edaspidi suurustest rääkides kasutada õigeid ühikuid. Selle asemel on võrdlustel kasutatud suurusjärke.

Originaalventilaatorit simuleerides näitab tarkvara suurimaks tõmbepingeks ~223 ühikut.



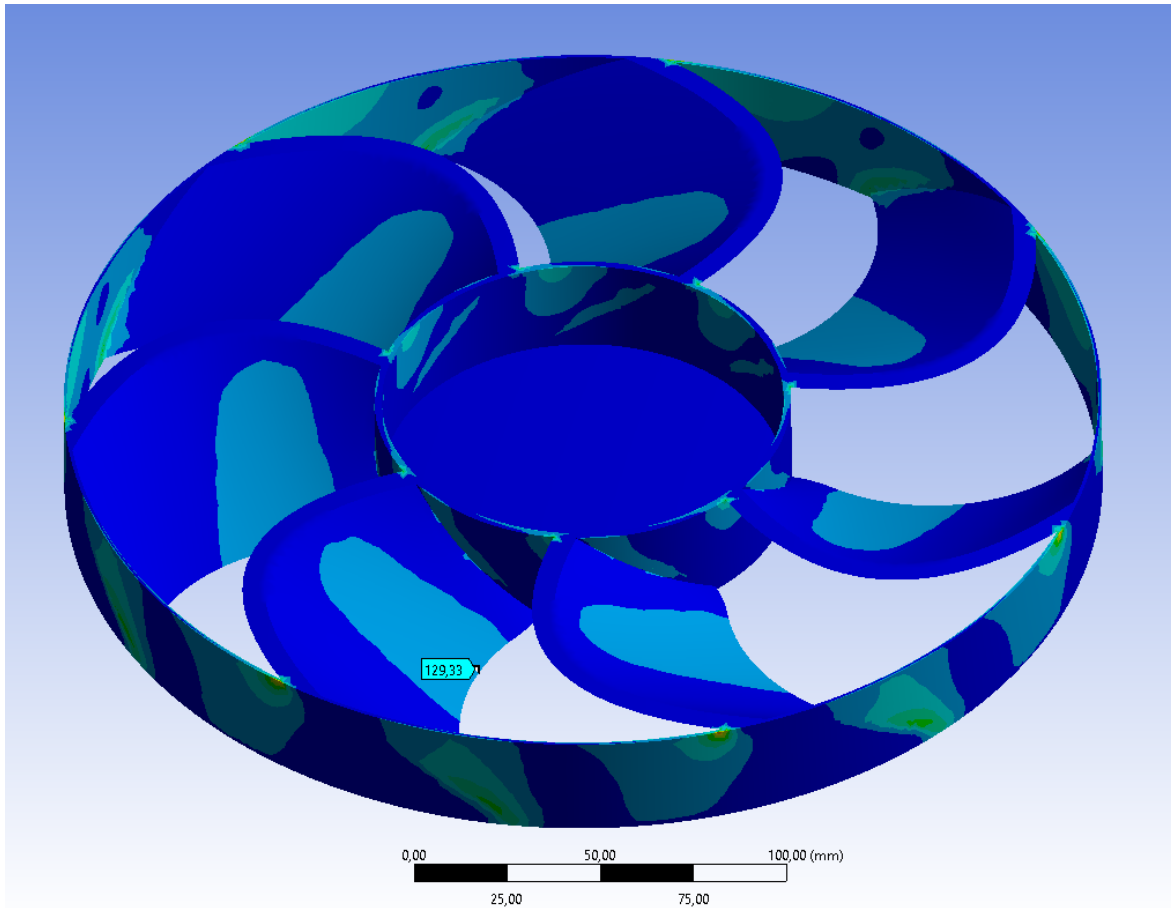
Sele 3.1: Originaaldisainiga ventilaatori pingesimulatsioon

Teiseks proov materjali lisamisega labadele. Materjali paksus on kasvatatud kahekordseks ning sellega on kaasnenud 1,5-kordne kaalulisa. Suurimaks pingeks on ~141 ühikut.



Sele 3.2: Labal kahekordse materjali paksusega ventilaatori pingesimulatsioon

Kolmandaks on lisatud ventilaatorile teda ümbritsev õhuke, kõigest 1 mm paksune „võru.“ Kaalu on lisandunud kõigest ~16% ning suurimaks pingeks ventilaatorilabal on kõigest ~129 ühikut.



Sele 3.3: „Võruga“ ventilaatori pingesimulatsioon

Kokkuvõttes on parimaks lahenduseks ventilaatorile võru lisamine. Kaalu lisandub minimaalselt, pingelangeb märkimisväärselt ning võruga on välistatud ka ventilaatori laba takerdumine.

Ventilaatori disaini muutmisega kaasnevad kahjuks ka mõned probleemid:

- õhuvoolu karakteristikud muutuvad (kuigi võru lisamisega on see minimaalne)
- vajadus uue vormi järgi
- uus ventilaator nõuab uuesti homologeerimist

Kõik see on kahjuks suur aja- ja finantskulu.

3.2 Uue materjali valik

Üheks ventilaatori tugevdamise viisiks on parema materjali valimine. Suundi uue materjali valikul on kaks.

Kuna laba murdumine toimub materjali hapruse tõttu, on üks võimalus kasutusele võtta uus, pehmem materjal. Hetkel on ventilaatori materjaliks PA66-GF33. Klaaskiud polüamiidis muudavad materjalisegu jäigemaks. Kui klaaskiu osakaalu materjalis vähendada, muutub materjal pehmemaks. Seega võiks uue materjalina võtta kasutusele PA66-GF25. Kahjuks on aga pehmema materjali valimisel ka negatiivne külg – ventilaatori labad võivad hakata läbi painduma piisavalt palju, et tekiks kontakt tuulekoja vaheseinaga, tulemuseks järjekordne purunemine. [10]

Teine variant oleks kasutusele võtta veel jäigem, tõmbele ja paindele vastupidavam materjal. Ka seda saaks teha klaaskiu sisalduse muutmisega materjalisegus, kasutades näiteks PA66-GF43 materjali. [10]

Enne uue materjali üle otsustamist tuleb kindlasti katselaboris mõõta ära nende omadused ning teha vastavad arvutisimulatsioonid.

3.3 Tootmisprotsessi täiustamine

Survevalu viisil tootmine on hea oma kõrge tootlikkuse poolest. Tootmistsükkel võib olla kuni 10 sekundi pikkune ning tootlikkust on võimalik tõsta veel mitme toote samaaegselt vormimisega. Jahutusventilaatori pinda uurides on näha, et konkreetne ventilaator on tootmiskiiruse tõttu kannatada saanud – materjal pole enne vormimist piisavalt üles sulanud ning vormis ühtlase struktuurina maha jahtunud. Kui tootmisprotsessi täiustada näiteks aeglustamise või temperatuuri tõstes, oleks tõenäoliselt ventilaatori materjal ühtlasem ning purunemine olnud raskendatud.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli uurida Ford Fiesta R5 ralliautol kasutatava jahutusventilaatori purunemise põhjuseid materjali seisukohalt.

Lõputöö käigus, teooria osas tutvustati plastide ajalugu, tutvustati plaste, nende liigitust, omadusi ja tootmisprotsesse, kirjeldati polüamiidi (PA) siseehitust ning plastide purunemise põhjuseid erinevate nurkade alt. Lõputöö eesmärgi täitmiseks oli vaja uurida ja võrrelda ventilaatorite materjale, mida tehti suurendades purunemispinna fotosid ning võrreldes materjali kõvadust. Lisaks pakuti välja lahendusi edasiste purunemiste vältimiseks.

Lõputöö käigus selgus, et materjal on antud disainilahenduse jaoks vale jäikusega. Kui ventilaatorilabad oleks tugevamad, ei murduks nad nii lihtsalt. Kui ventilaatorilabad oleksid pehmemad ning vajuksid läbi, kannataksid nad enne murdumist rohkem koormamist.

Probleemi lahendamiseks pakuti välja mitu varianti – ventilaatori disaini ja/või materjali muutmist ning tootmisprotsessi täiustamist.

Kuna SPALi näol on tegu masstootjaga kes ei spetsialiseeru oma toodetega koormusetaluvuse suhtes täpsemalt, pole neil tõenäoliselt seni olnud huvi oma toodete kvaliteedikontrolli vastu, sest tavajuhtudel (st tänavasõiduautodel) selliseid koormusi ventilaatoritele ei lange. Tänavasõiduautodel antud ventilaatoritega purunemise suhtes probleeme ei teki.

Edasi peaks antud probleemiga tegelema autode tootja M-Sport. On selge, et SPALi kvaliteedikontroll pole piisav. Sulamata graanulid näitavad, et tegu on praaktoodetega. Ehk on SPAL nõus oma toodete kvaliteedikontrolli täiustama ja/või tootmise kriitilise pilguga üle vaatama, või tuleks M-Spordil ventilaatorite tarnijat vahetada. Kahjuks kaasneb sellega ka auto jahutuse uuesti disainimine, selle homologeerimine ning klientidele uute ventilaatorite tarnimine koos põhjendustega, miks selline muudatus tehti. Ettevõtte mainele see tõenäoliselt kaasa ei aita.

SUMMARY

The aim of the current bachelor thesis was to find the reasons behind Ford Fiesta R5 rallycar's cooling fan break down in the view of the material.

The history of plastics, plastics and their classification, qualities and production process, polyamide and the reasons behind usual plastic break downs were studied in the theoretic part. The goal of this thesis was to find and the differences of two different materials, which was done by studying magnified photos of the surface where the fan blades were broken. Also, material hardnesses were compared. In addition, solutions were proposed.

It was found that the material was not correct for the car's cooling pack design. The material was with the wrong stiffness. If the stiffness would have been lower, the blade's would have bend instead of breaking. If the stiffness would have been higher, the blade's would have been stronger and would have stand greater forces.

To prevent the problem, solutions were proposed - change the design of the cooling fan, change the material, and third was to improve the production process and quality check.

Since SPAL is a mass producer of cooling fans and they do not specialize in making special fans which could stand bigger loads, it is likely that they do not have a thorough quality check on their products. Under normal conditions, road cars do not have these kinds of loads on the cooling fan. With these kinds of fans, road cars will not have any problems.

To finish this problem and find a final solution, M-Sport should contact SPAL. It is clear that SPAL's wuality check is not working. Unmelted polyamid granuls show that the fans are not produced correctly. Maybe they can improve their production and/or quality check. If not, M-Sport should reconsider their supplier. Unfortunately, with a new supplier, M-Sport has to redesign the cooling package, homologate it again, and supply their clients with new cooling fans.

KASUTATUD KIRJANDUS

Kirjandus

- [1] Jensen, W. B. *The Origin of the Polymer Concept – Ask the Historian*, Department of Chemistry, University of Cincinnati, 2008
- [2] Hermes, M. *Enough for One Lifetime. Wallace Carothers, Inventor of Nylon*, Chemical Heritage Foundation, 1996
- [3] Hendre, E., Kulu, P., Kübarsepp, J., Metusala, T., Tapupere, O. *Materjalitehnika – õpperaamat*, TTÜ Kirjastus, 2003
- [4] Kulu, P., Nava, R.-B. *Tehnoplastid*, Tallinn, 1999
- [5] Christjanson, P. *Polümeermaterjalid I – üldised alused*, TTÜ Kirjastus, 2006
- [6] Unt, K.-E., *Polümeermaterjalid – E-kursuse materjal*, Eesti Lennuakadeemia, 2010
- [7] Christjanson, P. *Polümeermaterjalid II – saamine, omadused ja kasutamine*, TTÜ Kirjastus, 2007
- [8] Noda, K., Takahara, A., Kajiyama, T. *Fatigue failure mechanisms of short glass-fiber reinforced nylon 66 based on nonlinear dynamic viscoelastic measurement*, Jaapan, 2000
- [9] Kulu, P., Saarna, M., Tarbe, R., Kers, J., Veinthal, R. *Materjaliõpetuse praktikumide ja kodutööde juhendid*, TTÜ Kirjastus, 2010
- [10] Kim, G.-H., Lee, J.-W., Seo, T.-I., *Durability Characteristics Analysis of Plastic Worm Wheel with Glass Fiber Reinforced Polyamide*, Korea, 2013

Kirjavahetused

- [11] M-Sport Ltd (Chris Williams). 05.2014

Internetmaterjalid

- [12] eFunda: Introduction to Injection Molding,
http://www.efunda.com/processes/plastic_molding/molding_injection.cfm
(19.05.2014)
- [13] Dettaglio motore assiale, SPAL Automotive
http://www.spalautomotive.com/eng/products/view_axial.aspx?id=VA03-AP90_LL-88S (26.04.2014)

LISAD:

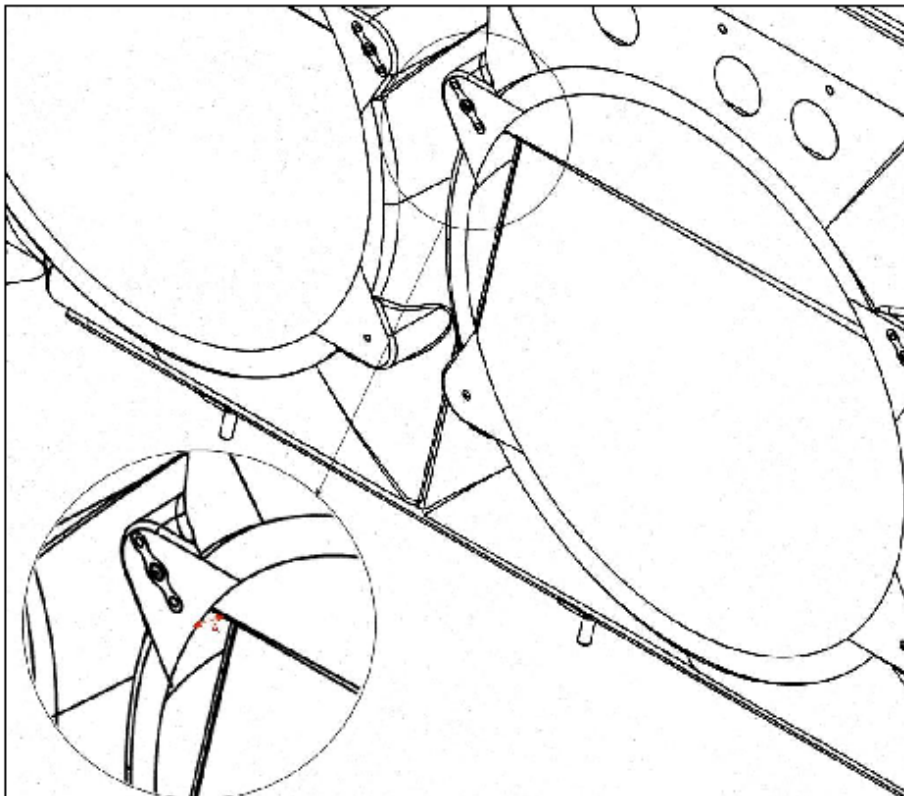
LISA NR 1: Fiesta R5 Technical Bulletin 19 - Cooling Package Clearance



Technical Bulletin

No. 19
Issue Date: 05/02/14
Concerning: Cooling package
Vehicle Spec: R5
Author: Adam Taylor
Circulation: External

Customers should check their R5 cooling packages are trimmed correctly to allow sufficient clearance for the fan blades. All new cooling packages fitted to cars should also be measured before the car is used.



LISA NR 1: Fiesta R5 Technical Bulletin 19 - Cooling Package Clearance

M-SPORT



R5



Dimension A must be 8 mm for all of the 4 top mounting points for the fan. This will ensure sufficient clearance for the fan blades. If the dimension is less than 8mm then customers should trim the cooling package accordingly.

For more information or any queries please contact Dan Broomfield (DBroomfield@m-sport.co.uk)



LISA NR 2: Ford Fiesta R5 homologeeringu väljavõte

Marque / Make: **FORD MOTOR COMPANY LTD**
 Modèle / Model: **FIESTA R5**

Homologation N°:
A-5748

Extension N°:
02/01 VR5

332. VENTILATEUR DE REFROIDISSEMENT / COOLING FAN

a) Nombre Number	FREE	a1) Référence Reference	BV2215-0001B				
b) Diamètre de l'hélice Diameter of the screw	280	± 5mm					
c) Matériau de l'hélice Material of the screw	PLASTIC	d) Nombre de pales Number of blades	7				
e) Type d'entraînement Type of drive	ELECTRIC	f) Ventilateur débrayable Automatic cut off	<table border="0"> <tr> <td>Oui / Yes</td> <td>Non / No</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </table>	Oui / Yes	Non / No	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Oui / Yes	Non / No						
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						

C13-5) Ventilateur de refroidissement - déposé
Cooling Fan - *dismounted*

