EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Imre Hade

AHJUS TOIMUVA PÕLEMISPROTSESSI JUHTIMISE AUTOMAATIKA

CONTROL AUTOMATICS FOR BURNING PROCESS IN OVEN

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendajad: lektor Mart Hovi, MSc
lektor Külli Hovi, MSc

Tartu 2016

www.emu.ee

Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Imre Hade		Õppekava: Energiakasutus	
Pealkiri: Ahjus toimuva põlemisprotsessi juhtimise automaatika			
Lehekülgi: 79	Jooniseid: 19	Tabeleid: 2	Lisasid: 5
Osakond: Energeetika Uurimisvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika Juhendaja(d): lektor Mart Hovi, lektor Külli Hovi Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2016			

Magistritöö eesmärgiks oli uurida, kuidas põlemisautomaatika kasutamise abil vähendada ahjude kütmisel välisõhku paisatavat emissiooni, parandada kasutegurit ning muuta ahikütet samal ajal kasutajasõbralikumaks. Need välja toodud aspektid on tänapäeva ühiskonnas üha suureneva tähtsusega. Magistritöö teoreetilises osas on käsitletud ahikütet üldiselt ja sellele mõeldud põlemisautomaatika seadmeid. Praktilise osana on töö autor ehitanud seadme, mis erineb teistest sarnastest sellepoolest, et põlemisprotsessi juhitakse põlemisõhu reguleerimisega, mis põhineb suitsugaasis sisalduva hapniku osamahu tagasisidel. Uudne on ka see, et hapniku osamahu määramiseks on kasutatud sõidukitele mõeldud hapnikuandurit. Töös annab autor ülevaate põlemisautomaatika ehitamiseks kasutatud riist- ja tarkvarast. Diplomitöö viimases osas on katseliselt hinnatud projekteeritud ja ehitatud põlemisautomaatika vastavust seatud eesmärkidele. Tulemusena saavutati automaatikat kasutades puhtam ja efektiivsem põlemine küttekoldes ning kauem kestev põlemisprotsess, mis on oluline soojust salvestavate kütteseadmete seisukohalt.

Märksõnad: ahiküte, põlemisautomaatika, liigõhutegur, põlemisõhk, hapnikuandur

www.emu.ee
Eesti Maaülikool
Estonian University of Life Sciences

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Imre Hade		Speciality: Energy Application Engineering	
Title: Control Automatics for Burning Process in Oven			
Pages: 79	Figures: 19	Tables: 2	Appendixes: 5
Department: Department of Energy Engineering Field of research: 4. Natural Sciences and Engineering Supervisors: lecturer Mart Hovi, lecturer Külli Hovi Place and date: Tartu 2016			

The aim of the thesis was to study how the use of automatic combustion control is reducing emissions emitted from ovens, making them more efficient and user friendly. All the named aspects are becoming more important in modern society. In theoretical part of master's thesis oven heating and automatic combustion control devices in general are described. The practical part of the work involves building a burning automation that differs from similar devices because combustion air control is based on feedback of oxygen measured in flue gas. Novel is also that the oxygen content measurement in flue gas is carried out with oxygen sensor used in automotive applications. The author gives an overview of hardware and software that is used to build control automatic for burning process in oven. In the last part of the diploma the conformity of designed and built automatic to the set goals is evaluated experimentally. As a result of automation the combustion process is cleaner, more efficient and longer lasting which is important in terms of furnaces that store heat.

Keywords: oven heating, combustion automatics, excess-air coefficient, combustion air, oxygen sensor

SISUKORD

TÄHISED JA LÜHENDID 6
SISSEJUHATUS 7
1. AHIKÜTE 9
1.1. Ahikütte olemus 9
1.2. Ahikütte olulisus 9
1.3. Ahikütte kasutamine tänapäeval 12
1.4. Ahju kütus 13
1.5. Tahkekütuse põlemine 14
1.6. Põlemisõhk 15
1.7. Mürgised suitsugaasi komponendid 18
1.8. Tõmme 21
2. PÕLEMISAUTOMAATIKA 23
2.1. Põlemisautomaatika ajalugu 23
2.2. Põlemisautomaatika olulisus 24
2.3. Tatarek põlemisautomaatika Ihaste ahju näitel 26
3. HAPNIKUANDURI TAGASISIDEL PÕHINEV PÕLEMISAUTOMAATIKA 30
3.1. Automaatika projekteerimine 30
3.2. Ahju suitsugaasis sisalduva hapniku mõõtmine autotööstuses kasutatava hapnikuanduriga 30
3.3. Juhtseade Raspberry Pi 34
3.4. Hapnikuandur 38
3.5. Termopaar – suitsugaasi temperatuuri mõõtmine 42
3.6. Õhuklapp ja samm-mootor 44
3.7. Tarkvaralahendus 48
3.8. Seadeväärtused põlemisautomaatika koodis 49
4. EHITATUD PÕLEMISAUTOMAATIKA KATSETAMINE 51
4.1. Läbiviidud katsetest üldiselt 51
4.2. Katsed pilukolde pliidiga 51
4.3. Katsed restkolde tellisahjuga 54
KOKKUVÕTE 58

KASUTATUD KIRJANDUS 60
CONTROL AUTOMATICS FOR BURNING PROCESS IN OVEN 66
LISAD 68
Lisa 1. Põhikood 69
Lisa 2. Hapnikuanduri mooduli kood 71
Lisa 3. Samm–mootori juhtimise mooduli kood 73
Lisa 4. Termopaari mooduli kood 74
Lisa 5. PID–regulaatori mooduli kood 77

TÄHISED JA LÜHENDID

ADC – *Analogue to Digital Converter*, analoog-digitaalmuundur on seade, mis muudab analoogsignaali digitaalsignaaliks

C^t – süsiniku hulk tarbimisaines %

g – raskuskiirendus m/s²

GPIO – *General Purpose Input/Output*, üldiseks kasutamiseks mõeldud kontaktid kiibil, mille otstarvet saab programmeerida

H – tuule poolt pinnale avaldatav rõhk mmH_2O

h – vaadeldava gaasisamba kõrgus m

HDMI – *High-Definition Multimedia Interface*, kõrglahutusega multimeedia kasutajaliides pildi ja heli edastamiseks

H_g – gaasi staatiline rõhk mmH_2O

H^t – vesiniku hulk tarbimisaines %

k – tegur, mis arvestab pinna paiknemist tuule suhtes

NOOBS – *New Out Of the Box Software*, Raspberry Pi jaoks loodud viisard operatsioonisüsteemi paigaldamiseks

O^t – hapniku hulk tarbimisaines %

$O_{2mõõdet.}$ – katses gaasianalüsaatoriga mõõdetud hapniku osamaht %

O_{2ref} – hapniku osamaht, millel soovitakse tulemust esitada %

PID – *Proportional-Integraal-Derivative*, proportsionaal-integraal-derivatiiv toimega regulaatori parameetrid

$ppm_{mõõdet.}$ – gaasianalüsaatoriga mõõdetud kontsentratsioon

SPI – S*erial Peripheral Interface*, jada välisliidese ja välisseadmete vaheline andmevahetuse standard

S^t – väävli hulk tarbimisaines %

UART – *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, programmeeritud mikrokiip, mis juhib arvutit ja välisseadmeid ühendavat jadaliidest

USB – *Universal Serial Bus*, universaalne jadasiin, mille abil ühendatakse arvuti külge erinevaid välisseadmeid

V – tuule kiirus m/s

V_0 – teoreetiline põlemiseks vajaminev õhuhulk m³/kg

W^t – puidu tarbimisaine keskmine niiskus %

γ_g – kuuma gaasi mahumass kg/m³

$\gamma_õ$ – ümbritseva õhu mahumass kg/m³

λ – liigõhutegur, mis on praktilise ja teoreetiliselt põlemiseks vajamineva õhuhulga suhe

SISSEJUHATUS

Tänapäeval on üha suuremaks probleemiks saamas üldine õhu saastatuse tase. Tiheasustusega piirkondades on oluliseks peenosakeste emissiooni allikaks eramajapidamiste ahiküte. Nende hulk inimeste sissehingatavas õhus on oluline, kuna see on mitmete terviseprobleemide põhjustaja ning eluea vähendaja. Meedias on viimasel ajal kajastatud uudiseid, kus poliitikud tahavad maailma erinevates paikades vähendada või koguni keelustada ahikütet, tulenevalt selle välisõhku saastavast toimest. Eesti kontekstis on puuküte olulise tähtsusega tänu meie suurtele metsavarudele. Lisaks on puidu puhul tegemist ka CO_2 neutraalse kütusega. Seetõttu ei tohiks kergekäeliselt suhtuda puukütte piiramisse ja keelustamisse. Õnneks on inseneride vaatevinklist probleemile ka teisi lahendusi kui asja keelustamine. Näiteks on võimalik välja töötada tehnilisi lahendusi, mis muudaksid põlemisprotsessi efektiivsemaks ja puhtamaks ning seeläbi aitaks vähendada ahikütte negatiivseid mõjusid nii inimesele kui ka loodusele.

Üheks selliseks tehniliseks lahenduseks on põlemisautomaatika, mille uurimisega on tegeletud ka käesolevas magistritöös. Lisaks turul olevate põlemisautomaatika seadmete uurimisele, on antud töö eesmärgiks ehitada seade, millega oleks võimalik ahjus toimuvat põlemisprotsessi paremini juhtida. Tulenevalt püstitatud eesmärgist, tekkis mitmeid küsimusi, millele tuli töö koostamise käigus vastused leida. Sellest lähtuvalt on lahendatud ka töö struktuuriline ülesehitus selliselt, kus neljast peajaotisest esimeses on käsitletud ahikütte üldist olemust, olulisust jms. Teine peajaotis tutvustab põlemisautomaatikat üldiselt ja sisaldab näitena ühe antud valdkonna seadme tööpõhimõtte analüüsi. Kuna uuritud seade ja mitmed teised ahjus toimuva põlemisprotsessi juhtimise automaatikad töötavad termoelektrilise termomeetri abil mõõdetud koldetemperatuuri alusel, tekkis idee ehitada seade, mis põhineks hapnikuanduri tagasisidel. Sellest lähtuvalt ongi magistritöö kolmandas peajaotises juttu erinevatest vajaminevatest riistvaralistest komponentidest, mida on kasutatud hapnikuanduril põhineva põlemisautomaatika seadme ehitamiseks. Samas peajaotises on käsitletud ka tarkvara ehk programmikoodi kirjutamist ja erinevaid seadeväärtusi, millega määrati põlemisõhku reguleeriva automaatikaseadme töö. Neljanda ehk viimase peajaotise sisuks on ehitatud põlemisautomaatika katsetamine, mille eesmärgiks

on selgitada välja viimase toimivus ja kasulikkus ahjus toimuva põlemisprotsessi efektiivsuse ja puhtuse tagamisel. Täpsemalt on kirjeldatud läbiviidud proovikütmisi erinevatel kütteseadmetel (pilukoldega pliit ja restkoldega tellisahi) enne ja pärast põlemisautomaatika paigaldamist. Järelduste tegemiseks on proovikütmistel sooritatud ka suitsugaasi analüüsid.

Tänan oma juhendajaid Mart ja Külli Hovi, kes olid igati abiks antud magistritöö valmimisel. Samuti tänan MTÜ Kütte- ja Ventilatsioonisüsteemide Teabekeskust, võimaldades osaleda töö autoril „Energiasäästlike ja keskkonnasõbralike kütteseadmete ehituse“ koolitusel. Suured tänud ka ahjumeistrile Lauri Lõhmusele, kelle abil oli võimalik tutvuda Poola firma Tatarek põlemisautomaatikaga.

1. AHIKÜTE

1.1. Ahikütte olemus

Ahikütte puhul on tegemist ühe tänuväärse ja üsna pikkade traditsioonidega soojasaamise viisiga. Tänuväärne on ahiküte eeskätt selle tõttu, et kütuseks kasutatakse biomassi, mistõttu võib ahikütet pidada suuresti CO_2-neutraalseks energiamuundamise viisiks (eeldusel, et põlemine ahjus on puhas). Põlemise kvaliteedi parendamisega tegeleb ka käesolev magistritöö. Ahikütte traditsioonid ulatuvad umbes 18. sajandisse, mil kujunesid välja esimesed ahjulõõristikud, mida kasutatakse tänapäevalgi. Ahjude esmane areng sai alguse aga ammu enne seda kui tekkisid esimesed lõõristikud. Nimelt ajal, kui hakati ruumis lahtiselt paiknenud tulekollet samm sammult piirama kivist seinte ja kerisekividega, mis salvestasid sooja. Soojasalvestusvõime ongi üks ahikütet enim iseloomustav suurus [1]. Kütuse põletamisel tekkinud soojusenergia salvestub esmalt ahju ehitamisel kasutatud materjalidesse, misjärel eraldub soojus järk-järgult ümbritsevasse keskkonda. Soojusülekanne toimub kiirguslikult ja konvektiivselt. Hinnanguliselt üle poole soojusest eraldub kiirguslikult, millega kaasneb ahjuga samas ruumis olevate kehade soojenemine [2]. Sama kiirgus soojendab ka inimese keha ning annab meile sellega seoses turva- ja heaolutunde. Seega ei saa kohe kindlasti öelda, et puuküttе eelistamine on tingitud üksnes selle odavusest. Uuritud on isegi seda, mille läheduses soovivad inimesed end soojendada, kui on tulnud väljast külma käest tuppa. Tulemustest selgub, et sooja otsitakse sellistel juhtudel pigem elava tule palgelt kui radiaatorist [3].

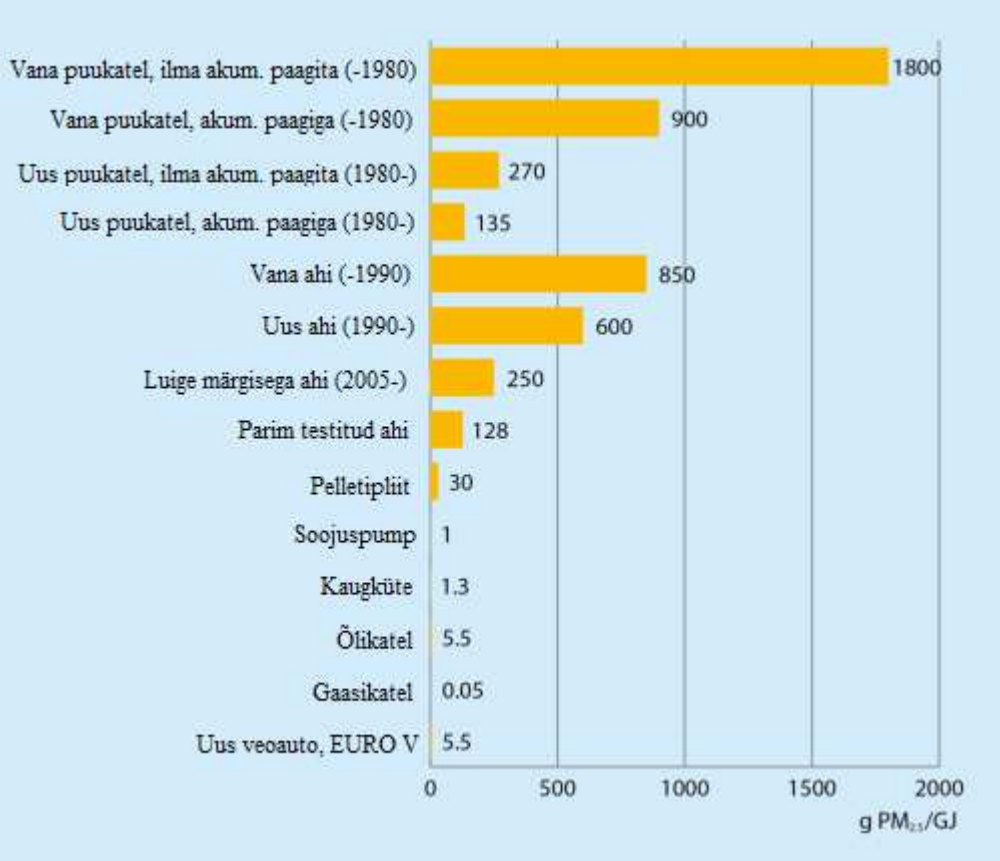
1.2. Ahikütte olulisus

Kuigi tänapäeval on ahiküte levinud eelkõige eramajapidamistes, on antud sektor suur ja ahiküttel selles oluline roll. Eestis on ehitusregistri andmetel umbes 164 000 majapidamist, mis kasutavad soojasaamiseks puitkütust ning umbes 80 % nendest on ahiküte [4]. Ahjusid on tõenäoliselt isegi rohkem, sest paljudes majapidamistes on rohkem kui üks ahi. Samuti võidakse ahju kasutada abiküttena ning ehitusregistris ei ole see kajastatud. Ühes artiklis on

ahjude arvuks Eestis pakutud isegi 400 000 [5]. Soomes näiteks arvatakse ahjusid olevat aga tervelt 3 miljonit, mis on üle poole suurem number rahvastiku koguarvust [3].

Peale selle võib välja tuua veel rida põhjuseid, miks ahiküte oluline on. Üheks selliseks on näiteks Eesti suur metsavaru. Üle poole Eesti maismaast on kaetud metsamaaga, mis tähendab, et me ei pea seda kuskilt kaugelt sisse ostma ning transportima, vaid saame ise puidu suhteliselt soodsalt kätte [6]. Kuigi puit on suhteliselt kergesti kättesaadav, siis küttepuude hinnad on sarnaselt teiste energiakandjatega siiski pidevalt tõusnud. Olenemata sellest peetakse puidul põhinevat kütet kõige odavamaks soojuse saamise allikaks elektri, gaasi jms võrreldes.

Puidu puhul on tegemist ka biokütusega ehk kütusega, mida saadakse biomassist. See on taastuv kütus, mille kasutamine peaks olema fossiilsetest kütustest oluliselt soositum. Sellele vaatamata on viimastel aastatel meedias ilmunud artikleid, kus räägitakse ahikütte tulemusena õhku paiskuvate peenete tahmaosakeste kahjulikkusest elanikkonna tervisele ja koguni ahikütte osalisest keelustamisest Euroopa Liidus. Autori seisukoht on, et ahikütet peaks pigem muutma keskkonnasõbralikumaks hetkel saadavaloleva tehnikaga, mitte üritama seda piirata või koguni keelustada. Selline asjade keelustamine tundub olema poliitikute seas populaarne, kuid tihtilugu ei lahendata sellega probleemi. Pigem leiavad probleemile lahenduse insenerid. Autotööstuses on näiteks insenerid viimaste kümnendite jooksul suutnud sõidukite summutist väljuvaid heitkoguseid vähendada mitmeid kordi. Seda suuresti tänu paremale mootori töö juhtimisele. Ka ahikütte puhul on võimalik saavutada olulisemalt paremaid tulemusi, kasutades paremaid põlemisprotsessi juhtimise võtteid. Seda tõestab ka näiteks osaliselt automatiseeritud pelletipliitide oluliselt madalam tahmaosakeste emissioon (joonis 1.1). Joonisel on esitatud Taani ja Šveitsi eriti peenete ($PM_{2.5}$) osakeste mõõtetulemused kütteseadmete lõikes ning võrdlusena on näidatud ka Euro V normile vastava veoauto heide. Oluliselt vähem paiskavad õhku peenosakesi tänapäevaste standardite järgi ehitatud kütteseadmed. Näiteks Põhjamaade keskkonnamärgisele (*swan lable stove*) vastavad pliidid on rohkem kui kolm korda keskkonnasõbralikumad kui enne 90–ndaid ehitatud. Samas uuringus on hinnatud, et eramajapidamiste puuküte põhjustab 70 % eriti peenete osakeste emissioonist Taani Kuningriigis [7]. Eestis on sama näitaja 2010. aastal olnud hinnanguliselt 50 % [8]. Seda, miks on peenosakesed olulised õhusaaste seisukohalt, on käsitletud alajaotises 1.6.



Joonis 1.1. Tahma peenosakeste emissioon [7]

Kokkuvõtvalt sõltub ahiküttе keskkonnasõbralikus sellest, kui palju me oleme valmis selle parandamiseks tegema. Siinkohal aitab kaasa erinevate normide kehtestamine ja miks mitte ka toetused ahju omanikele näiteks põlemisautomaatika paigaldamiseks.

Ahiküttе teeb oluliseks selle sõltumatus teistest energiaallikatest, eriti just elektrienergiast. Kui paljud teised küttesüsteemid (soojuspumbad, puhurid, katlad jms) ei saa töötada ilma elektrita, siis ahikütet elektri puudumine ei mõjuta. Tuleb lihtsalt puud ahju panna, need põlema süüdata ja peagi on ruum soe. Lisaks soojusele saame ahjult kütmise ajal valgust või kasutada seda söögitegemiseks. Seega on tegemist tähtsa seadmega energiajulgeoleku seisukohalt. Energiajulgeolek oli ju ka möödunud aasta Riigikogu valimistel võitnud Reformierakonna programmis tähtsal kohal. Seoses elektrienergiaga on ahiküttel suur tähtsus ka elektrivõrgu tasakaalus hoidmisel. Nimelt aitab ahiküte külmal perioodil elektrienergiat kokku hoida, kus elektrit tarbitakse niigi oluliselt rohkem kui suvisel ja valgel ajal.

Viimaseks punktiks, mida võib ahiküttе olulisuse all ära märkida, on üldise heaolu- ja nostalgiatunde tekitamine. Juba vanadel aegadel istusid inimesed koos lõkke ümber. Arvatakse, et ka tänapäeval on see nii, kuna elav soojus peaks andma rikkama elamuse. Ka talvel väljast tulles eelistatakse pigem end soojendama minna ahju kõrvale, mitte puhuri või soojuspumba juurde [3]. Palju on uuritud ka elava tule vaatamist, mis peaks inimesi rahustama ja end lõõgastunumalt tundma panema, muutes kogu ümbruse hubasemaks [9]. Nagu näha, on ahiküttе puhul tegemist elanike ja ka ühiskonna jaoks suhteliselt olulise küttesüsteemiga, millel on tõenäoliselt palju rohkem väärtusi kui antud alajaotises käsitletud.

1.3. Ahiküttе kasutamine tänapäeval

Nagu eelnevas peatükis juba mainitud, kasutatakse ahikütet peamiselt eramajapidamistes soojusallikana. Norras näiteks on kehtestatud nõue, mille järgi peab igas teatud suurusega majas olema alternatiivse soojusallikana puudega köetav kütteseade. Põhjuseks just eelkõige hädaolukorrad, mil elektrit pole. Sellega ei teki voolukatkestuste korral elanikkonna hulgas paanikat [3]. See aga ei tähenda automaatselt, et puuküte on ainus ja õige soojasaamise viis. Näiteks ei pruugi see sobida tiheasustusega piirkondadesse, sest emissioon varjutab biomassi kasutamise positiivsed küljed. Linnades pärsib ahikütet see, et puudub ruum, kus talve küttevarusid hoida ning nende hindki on üldjuhul kõrgem, näiteks transpordi tõttu. Seega on selge, et puuküte ei ole sobivaimaks sooja saamise viisiks kõigile ja kõikjal [10]. Siiski elab tänapäeval veel palju inimesi hajaasustusega piirkondades (vähemalt Eestis) ning tegemist on hea lokaalse energiaallikaga. Kui rääkida konkreetsemalt ahiküttest, on tegemist suhteliselt palju aega ja tähelepanu vajava kütteviisiga. Aeg kulub peamiselt puude toomiseks ahjuni, nende ahju asetamiseks, süütamiseks, põlemisprotsessiks ning alles seejärel saab siibri sulgeda ja näiteks kodust lahkuda. Need põhjused on peamised, miks tänapäeval eelistavad inimesed pigem teisi küttesüsteeme, eelkõige just nende mugavuse pärast. Samuti on tänapäeva inimeste elutempo sedavõrd kiire, et neil puudub aeg, mida kulutada igapäevaselt ahju kütmisele. Varasemalt oli perekonna koosseis suurem, koos elas mitu põlvkonda ning ahju kütmine oli tihtilugu vanavanemate ülesandeks, kes olid kodus. Tänapäeval on aga perekonnad väiksemad ning paljud majad seisavad päeval sageli tühjana [3]. Ahiküttе leviku seisukohast positiivseks teguriks tänapäeval on aga see, et majad ehitatakse üha soojapidavamad. See soosib suure salvestusvõimega ahjude kasutamist, sest hetkelise soojusvõimsuse vajadus on väiksem, salvestatud sooja jätkub kauemaks ning

igapäevane ahju kütmine ei pruugi enam vajalik olla. Käesolevas magistritöös ehitatud põlemisautomaatika aitab ahju kütmisele kuluvat aega veelgi vähendada. Küttepuud peab küll igaks uueks kütmiseks ahju asetama ja süütama, kuid põlemise reguleerimise ja õhuklapi sulgemise pärast ei pea enam muretsema. Automaatika ei iseloomusta küll veel tänapäevast ahikütet, kuid see võib tulevikus muutuda.

1.4. Ahju kütus

Enimkasutatavaks kütuseks ahjudes tule tegemisel on halupuu. Lisaks sellele põletatakse toaahjudes veel turbabriketti, turvast ja väiksemal määral ka kivisütt ja põlevkivi. Kütused koosnevad põlevast ja mittepõlevast ainest ehk põlevosast ja ballastist. Põlevelementideks on süsinik, vesinik ja väävel, mille sisaldus kütustes on varieeruv, nagu ka ballastiks oleva tuha ja niiskuse osamaht. Tarbija jaoks on eelkõige oluline kütuse kütteväärtus, mis sõltub tuhasusest ja niiskusest. Mida rohkem on kütuses ballasti, seda väiksem on kütteväärtus. Lisaks ballastile mõjutab kütteväärtust ka põlevaine koostis [1]. Soojusenergia saamiseks kasutatavate biomasskütuste põlevosa koostis varieerub vähe, seega on kuivaine kütteväärtused väga sarnased. Kuivaine kütteväärtus biomasskütustel jääb enamasti alla 18000 kJ/kg ehk 5 kWh/kg [11]. Kuivaine kütteväärtusest on tarbijale olulisem tarbimisaine vastav näitaja, kus on arvestatud niiskusega. Meil Eestis on olenemata küttepuidu liigist kütteväärtus umbes 3,6…3,83 kWh/kg niiskusel 20 %. Kuigi kütteväärtused on puidu liigiti väga sarnased, võib olla küllaltki erinev nende mahumass. Näiteks on kuusepuu mahumass umbes 1,6 korda väiksem kui tammel. Seega saame soojusenergiat sama suure sületäie kütmisel kuusega samuti 1,6 korda vähem. Mahumassi erinevust tuleks arvestada nii küttepuude ostmisel ruumimeetri alusel, kui ka ahju kütmisel. Tuleb meeles pidada, et suurema mahumassiga küttepuidule üle minnes tuleb seda kütteseadmele liiga tegemise vältimiseks ka mahuliselt vähem tarvitada. Seega üldiselt võib kasutada ahjus mistahes biomasskütust, senikaua kui on arvestatud selle mahumassiga. Olukord muutub, kui tahame ahju kütta kivisöe või põlevkiviga. Kivisöe ning põlevkivi keskmised kütteväärtused on vastavalt 3,02 kWh/kg ja 8,21 kWh/kg. Erinevalt kivisöest on põlevkivi kütteväärtus suhteliselt sarnane biomasskütusele, kuid sellele vaatamata ei ole mõistlik seda kasutada küttepuidule mõeldud ahjus. Põlevkiviga küttes täitub küttepuidule mõeldud ahi kiiresti lendtuha ja narmastahmaga, sest anorgaanilise mineraalaine (ballasti) sisaldus on põlevkivis

kõrge (üle 60 %) [1]. Kuna tahm on hea soojuse isolaator, väheneb oluliselt kütteseadme kasutegur. Näiteks lõõristiku seinal asuv 3 mm paksune tahmakiht põhjustab 10 % soojakao [3]. See aga ei tähenda, et põlevkiviga ei saaks toaahju kütta. Ida-Virumaal on praktilistele kogemustele tuginedes ehitatud ahjusid, mis ei tahmu ja on võimelised salvestama põlevkivi põlemisel tekkivat soojusenergiat. Kokkuvõtvalt saab ahju kütmiseks kasutada mitmeid kütuseid, kuid oluline on teada nende keemilisest koostisest tulenevat kokkusobivust vastava kütteseadmega.

1.5. Tahkekütuse põlemine

Põlemine on kütuse põlevaine ja hapniku keemiline ühinemisprotsess, mille tagajärjel eraldub soojus ning sõltuvalt vesiniku ja hapniku sisaldusest kütuses, tekib ka leek. Põlevsegu temperatuurist ja põlemisprotsessi juhitud hapniku hulgast sõltub leegi heledus. Kui hapnikku on vähe, tekib tume leek. Piisava hapniku olemasolul on leek kollakaspunane ja näeme ka hallikat suitsu. Kui leek on helevalge või sinakas, on tegemist liigse hapnikuga. Läbipaistva suitsuga leek on ka indikaatoriks, et hapnikku on liiga palju [1]. Tahkekütuse põlemine koosneb järgmistest staadiumitest:

1) kütuse kuumenemine ja kuivamine;
2) lendosa eraldumine ja põlemine;
3) süsiniku ehk koksi põlemine.

Esimene staadium leiab aset umbes 100 °C temperatuuril, mil puuhalust aurustub seal leiduv niiskus. Mida suurem on niiskusesisaldus, seda rohkem energiat ära kulutatakse, mistõttu on oluline kasutada kütmisel võimalikult väikese niiskussisaldusega küttepuud. Kui niiskus on aurustunud, hakkab tõusma temperatuur ja kütusest eralduma lendosad. Puidu puhul algab see umbes temperatuurist 150 °C [12]. Eralduva suitsugaasi (lendosad + põlemisõhk) süttimiseks, peab temperatuur tõusma vähemalt 350 °C-ni. Väiksemal temperatuuril lahkuvad suitsugaasid koldest põlemata kujul ning tulemuseks on märkimisväärne kogus saastet. See on paratamatus ja leiab aset alati, kui teeme tuld juba maha jahtunud küttekoldesse. Probleemi aitab leevendada kütuse pealtsüütamine. Pealtsüütamisega tagame leegi kütuse kohal, mis süütab alt ülesse tõusva suitsugaasi, laskmata seda põlemata kujul korstnasse. Oluline on ka teadmine, et lendosa põlemisel on põlemisõhu vajadus

kolderuumis suurim [3] ning selle põlemisaeg moodustab umbes 10 % kogu põlemisprotsessist. Viimane staadium ehk lendosa eraldumisel järelejäänud koksi (tahke mass, mis koosneb peamiselt süsinikust) põlemine leiab aset peale suurema osa gaasilise osa põlemist ja on kõige pikem protsess [12]. Praktikas kulgevad kõik nimetatud staadiumid samal ajal ning võimendavad üksteist [3].

1.6. Põlemisõhk

Kuna antud töös projekteeritud ja ehitatud põlemisautomaatika juhib põlemisprotsessi läbi koldesse siseneva põlemisõhu reguleerimise, on oluline mõista põlemisõhu rolli kütuse põletamisel, kuna reguleerimine põhineb suitsugaasis sisalduva hapniku mõõtmisel.

Põlemiseks vajalik hapnik saadakse õhust, mis sisaldab viimast mahuliselt ligikaudu 21 %. Ühe kg süsiniku täielikuks põlemiseks peab liituma 2,3 kg hapnikku. Vastavalt võrrandile $C + O_2 = CO_2$, on saaduseks 3,3 kg süsihappegaasi ja 9,1 kWh soojusenergiat. Praktikas ei pääse põleva süsiniku juurde aga piisavalt õhku ja tegemist on mittetäieliku põlemisega. Sellest tulenevalt on saaduseks süsinikoksiid (CO ehk vingugaas) ja väiksem protsessi kasutegur. Seoses sellega juhitakse põlemisprotsessi alati rohkem hapnikku kui teoreetiliselt vajalik. Siin kasutatakse mõistet liigõhutegur (λ), mis on praktilise ja teoreetiliselt põlemiseks vajamineva õhuhulga suhe [1]. Teoreetilise õhuhulga saame arvutada läbi puidu elementaarkoostise, mis valdavalt koosneb kolmest keemilisest komponendist ja moodustab kütuse põlevaine. Need komponendid (süsinik, vesinik ja hapnik) moodustavad kuivainest umbes 99 %. Veel on puitkütuses lämmastikku (tavaliselt alla 0,2 %) ja väävlit (alla 0,05 %) kuivainest [13]. Kolme peamise elemendi hulk on puitkütuses umbkaudu järgmine: süsinikku 52 %, vesinikku 6 % ja hapnikku seega 41 % [14]. Teoreetiline põlemiseks vajaminev õhukogus on leitav valemiga 1.1 [15]:

$$V_0 = 0{,}0889(C^t + 0{,}375S^t) + 0{,}265H^t - 0{,}0333O^t, \qquad (1.1)$$

kus V_0 on teoreetiline põlemiseks vajaminev õhuhulk m³/kg;

C^t – süsiniku hulk tarbimisaines %;

S^t – väävli hulk tarbimisaines %;

H^t – vesiniku hulk tarbimisaines %;

O^t – hapniku hulk tarbimisaines %.

Tarbimisaine koostis tuleneb kuivaine koostisest, arvestades puidu tarbimisaine keskmist niiskust W^t = 17 %, mis on saadud niiskuse määramisega antud töö katselises osas. Teoreetiline põlemiseks vajaminev õhukogus normaalkuupmeetrites on leitud kasutades valemis 1.2 tüüpilist kuivaine koostist ja korrutades tulemus teguriga $n = (100\text{-}W^t)/100 = 0{,}83$.

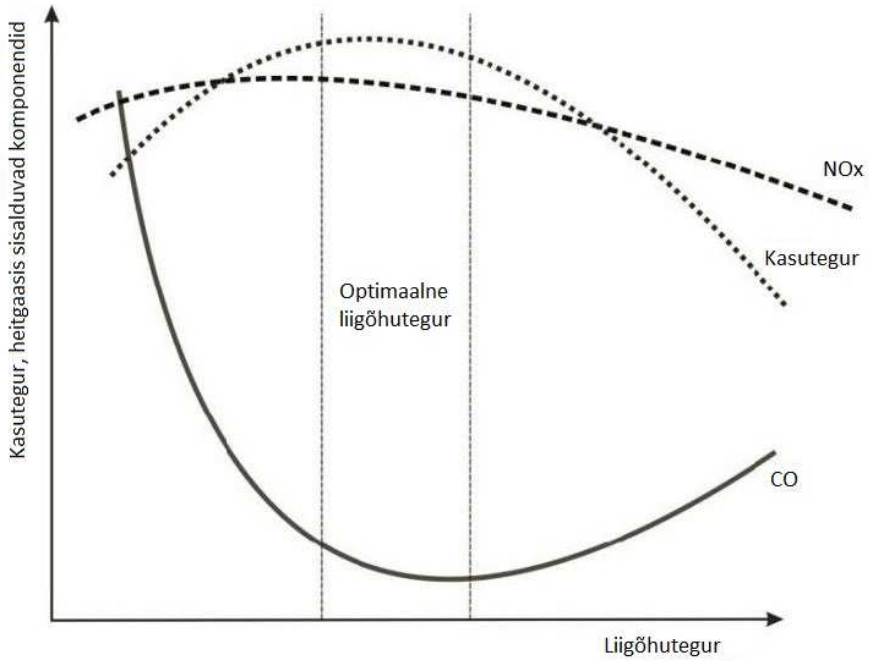
$$V_0 = 0{,}83(0{,}0889(52 + 0{,}375 \cdot 0{,}05) + 0{,}265 \cdot 6 - 0{,}0333 \cdot 41) = 4{,}02\ m^3/kg \quad (1.2)$$

Praktilise õhukoguse leidmiseks tuleb leitud tulemus (4,02 m³/kg) korrutada liigõhuteguriga. Viimane sõltub kasutatavast tehnoloogiast ja kütusest. Tüüpilised liigõhutegurite väärtused on esitatud tabelis 1.1.

Tabel 1.1. Tüüpilised liigõhutegurite väärtused [16]

Kütteseade	**Liigõhutegur, λ**	**O_2, %**
Lahtine tulekolle	>3	>14
Ahiküte	2,1 -2,3	11 - 12
Kaugküte (hakkpuit)	1,4 – 1,6	6 - 8
Kaugküte (pellet)	1,2 – 1,3	4 - 5
Koostootmisjaam (puidutolm)	1,1 – 1,2	2 - 3

Ahikütte liigõhutegur on vastavalt tabeli 1.1 andmetele vahemikus 2,1…2,3. Et praktikas on biomassil töötavate küttekollete puhul liigõhutegur tihti suurem kui 2, seda kinnitavad ka teised kirjandusallikad. Optimaalseks liigõhuteguriks peetakse siiski vahemikku 1,2…1,5 [17]. Taolised madalamad liigõhuteguri väärtused on iseloomulikumad eelkõige vastavalt tänapäevastele standarditele ehitatud ja sageli automatiseeritud küttekolletele. Seda kinnitab ka antud töö koostamise käigus läbiviidud pilukoldega ja põlemisautomaatikaga varustatud ahju suitsugaaside mõõtmine, kus saavutati põlemisprotsessi madalaim vingugaasisisaldus liigõhuteguril umbes 1,5. Kahjulike suitsugaasi komponentide, nagu näiteks vingugaasi ja lämmastikoksiidide (NO, NO_2) sõltuvust liigõhutegurist iseloomustab joonis 1.2. Samal joonisel on ka esitatud liigõhuteguri mõju kasutegurile.



Joonis 1.2. Kasuteguri, CO ja NO_x sõltuvus liigõhutegurist [18]

Jooniselt 1.2 näeme, et optimaalset liigõhutegurit on hea määrata kasuteguri ja/või vingugaasi sisalduse alusel. Näiteks liigõhutegurit kasuteguri järgi valides saavutame üldjuhul ka madala vingugaasi sisalduse või vastupidi. Samas lämmastikoksiidide sisalduse järgi on raske leida põlemisprotsessile sobivaimat liigõhutegurit.

Tuginedes varasemalt arvutatud teoreetilisele õhuhulgale ja liigõhutegurile, saame leida praktilise põlemiseks kuluva õhuhulga. Vastavalt tabelis 1.1 toodud andmetele on ahiküttе puhul 1 kg puidu täielikuks põlemiseks tarvis ligikaudu $4{,}02 \cdot 2{,}2 = 8{,}8$ m³ õhku. Kui eeldada, et ahju kütmiseks kulub 10 kg puitu, on vajaminev õhukogus 88 m³. Tegemist on ligikaudu samasuure õhumahuga, nagu ruumi kubatuur, mille kütmiseks kasutatakse sellist ahju. Siinkohal mängib lisaks ruumi kubatuurile rolli ka viimase õhutihedus. Vanemad hooned ei ole nii õhutihedad, et ahju kütmisel peaks tekkima õhupuudus ja olema häiritud küttekolde töö. Põlemiseks vajaminev õhk pääseb tuppa näiteks läbi piirdekonstruktsiooni ja ebatihedate uste ning akende. Õhupuudus ohustab aga tänapäevaste ehitusnormide järgi ehitatud maju, mis on ehitatud õhupidavaks, et saavutada kõrget energiatõhusust. Euroopa Liidu energiatõhususe direktiivist 2010/31/EL lähtuvalt peavad kõik alates 1. jaanuarist 2021. aastast ehitatud uued ja oluliselt rekonstrueeritavad hooned vastama liginullenergiahoone nõuetele [19]. Võib arvata, et muude küttesüsteemide populaarsusele vaatamata ehitatakse paljudesse nimetatud hoonetesse ahi vähemalt abiküttena. Tulles tagasi

põlemisõhu teemale, siis koldes kütuse põletamisest tingitud õhupuudust ei teki juhul, kui hoonesse on paigaldatud automaatne ventilatsiooniseade, mis omab rõhuandurit ja on võimeline suure alarõhu tekkimisel seda kompenseerima. Vastasel juhul tuleb olemasolul avada värskeõhuklapp või selle puudumisel aken. Üheks võimalikuks lahenduseks on võtta põlemisõhk väljast spetsiaalse õhukanali kaudu. See eeldab üldjuhul, et hoone ehitusprojekti koostamisel on selge, kus planeeritav ahi paiknema hakkab. Kuna õhukanalis liigub külm välisõhk, peab ehitamisel tähelepanu pöörama kanali soojusisolatsioonile ning ekspluatatsiooni käigus õhku koldesse lubava klapi tihedusele. Viimase ebatiheduse korral toimub ahju müüritisse salvestunud soojuse ära kandumine. Ülimalt oluline on ka vastava klapi õigeaegne sulgemine peale kütmist. See on saavutatav väga hoolika põlemisprotsessi jälgimisega või automaatika kasutamisega, mille rakendamisega tegeleb ka käesolev töö.

1.7. Mürgised suitsugaasi komponendid

Ideaalse põlemise korral tekib suitsugaasis süsihappegaas (CO_2), veeaur ja eraldub põlemisõhust pärit lämmastik. Praktikas see nii aga ei ole ja tekib ka mitmeid mürgiseid komponente [20]. Antud töö käigus on tehtud mitmeid mõõtmisi heitgaasianalüsaatoriga. Enamasti oli eesmärgiks jälgida liigõhutegurit, millest oli juttu eelmises alajaotises. Kuna heitgaasianalüsaator mõõtis ka mürgiste suitsugaasi komponentide (CO, NO_x, HC) kontsentratsiooni, on paslik ka neid lähemalt uurida. Seda enam, et töö tulemusena on ehitatud põlemisautomaatika, mille toimivust on hea kontrollida, mõõtes suitsugaasi komponentide kontsentratsiooni enne ja peale automaatika paigaldust. Et mitte ainult võrrelda töö käigus kogutud tulemusi omavahel, on igati sobilik tugineda standarditele.

Eestis on hetkel kaks kehtivat standardit, mida saab kasutada ahju suitsugaasis sisalduvate mürgiste komponentide mõõtmiseks ja hindamiseks. Antud standardid on hetkel soovituslikud. Kohustuslikuks muutavad need alles peale Euroopa Liidu vastavasisuliste direktiivide kehtestamist. Standard EN 15544 on algselt Austriast pärit ning käsitleb kahhel- ja krohvitud pinnaga ahjude dimensioneerimist ning toob välja vastavalt standardile ehitatud ahjude suitsugaasikomponentide ja kasuteguri normid. Teine standard (EN 15250) käsitleb nõudeid ja katsemetoodikat tahkekütusel töötavatele, aeglaselt soojust eraldavatele

kütteseadmetele. Antud standardite piirnormid suitsugaasi komponentidele ja kasutegurile on esitatud tabelis 1.2.

Tabel 1.2. Standardite normid suitsugaasi mürgistele komponentidele ja kasutegurile [21,22]

Parameeter	EN15544	EN15250
CO - Vingugaas, mg/MJ	1000	2500
NO_x - Lämmastikoksiidid, mg/MJ	150	-
HC - Orgaaniliselt seotud süsinik, mg/MJ	80	-
PM - Peenosakesed, mg/MJ	60	-
η – Kasutegur, %	78	70

Tabelis 1.2 esitatud andmete abil omame ettekujutust, millises suurusjärgus on standardi järgi ehitatud ahjude saaste ning saame võrrelda seda antud töö käigus läbiviidud suitsugaasi mõõtetulemustega. Mõõtetulemuste võrdlemise seisukohalt on tähtis, millisel hapniku osamahul on need esitatud. Nimelt liigõhk suitsugaasis lahjendab mõõdetavate komponentide kontsentratsiooni. Soovides mõõtetulemusi näiteks ühikuga ppm esitada kindlal hapniku osamahul, saame kasutada valemit 1.3 [20]:

$$ppm = ppm_{mõõdet.} \cdot \frac{21 - O_{2ref}}{O_{2mõõdet.}}, \tag{1.3}$$

kus ppm on gaasi kontsentratsioon soovitud O_2 osamahul;

$ppm_{mõõdet.}$ – gaasianalüsaatoriga mõõdetud kontsentratsioon;

O_{2ref} – hapniku osamaht, millel soovitakse tulemust esitada;

$O_{2mõõdet.}$ – katses gaasianalüsaatoriga mõõdetud hapniku osamaht.

Nimetatud standardites on normid esitatud hapniku osamahul 13 %.

Kuigi antud töö käigus peenosakeste kontsentratsiooni suitsugaasis kordagi ei mõõdetud, on see oluline õhusaaste tekitaja ja väärib käsitlemist. Peenosakesed on klassikaliselt jagatud kolme fraktsiooni. Põlemisprotsessist eralduvad enamasti ülipeened osakesed ($PM_{2,5}$), mis on suurusega alla 2,5 µm ja mida on käsitletud ka käesolevas töös. Veel on olemas peenosakesed, mis on väiksemad kui 10 µm ja ultrapeened (<100 nm). Kui võrrelda standardi EN 15544 peenosakeste normi 60 mg/MJ ja joonisel 1.1 esitatud Taani ja Šveitsi uuringutulemusi, näeme seda, et standardi järgi ehitatud ahi on peaaegu võimeline konkureerima pelletipliidiga (30 mg/MJ) ja on oluliselt vähem saastavam kui traditsiooniline

pliit (850 mg/MJ). See näitab, et antud valdkonnas saab saaste vähendamiseks nii mõndagi ära teha. Nimelt on leitud, et peenosakesed mõjutavad hingamisteedesse sattudes oluliselt inimese tervist. Need koosnevad raskemetallidest ja orgaanilistest ning keemilistest ühenditest, mis organismi sattudes võivad põhjustada põletikke. Uuringud on näidanud, et Eesti kesklinnades ja lokaalkütte piirkondades väheneb peenosakeste tõttu inimeste eluiga keskmiselt 1,1 aastat. Äärelinnades jääb oodatav eluea vähenemine madalamaks ehk mõne kuu kanti [23]. Kui nüüd arvestada juba alajaotises 1.2 käsitletud numbrit, et Eestis on hinnanguliselt pool peenosakeste emissioonist seotud eramajapidamiste puuküttega, siis keskkonnasõbralike kütteseadmetega, mis on vastavalt standarditele ehitatud ja põlemisautomaatikaga varustatud, on võimalik seda numbrit oluliselt vähendada.

Peenosakesed ei ole aga kaugeltki ainuke kahjulik komponent suitsugaasis. Üheks tähtsaks põlemist iseloomustavaks gaasiks on vingugaas (CO), mis tekib ebatäielikul põlemisel. Ebatäieliku põlemise põhjuseks on enamasti hapnikupuudus põlemisprotsessis. Samas ei tohi ka liiga palju õhku koldesse juhtida, sest see toob kaasa temperatuuri languse ja tulemuseks on samuti mittetäielik põlemine. Suutes viia vingugaasi kontsentratsiooni minimaalseks, saame puhtama põlemise ning vähenenud põlemata vesiniku ja süsiniku ühendite (HC) ja tahma sisalduse suitsugaasis [24]. Omadustelt on vingugaas värvitu, lõhnatu ning maitsetu. Sisse hingates aga väga mürgine, sest moodustab hemoglobiiniga veres püsiva ühendi, pärssides sellega keha hapnikuvarustust. Teadaolevalt loodusele vingugaas märkimisväärset mõju ei avalda [25].

Õhu ja kütuse orgaanilise osa lämmastikust tekib lämmastikmonooksiid (NO) ja lämmastikdioksiid (NO_2), mis moodustavad kokku lämmastikoksiidid (NO_x) . Need on ka happevihmade ja sudu põhjustajateks lisaks väävliühenditele. Lämmastikmonooksiid tekib koldes kõrgetel temperatuuridel, madalamatel aga oksüdeerub lämmastikdioksiidiks. Mõõdetakse tavaliselt lämmastikmonooksiidi kontsentratsiooni suitsugaasis. Eeldatakse, et lämmastikdioksiidi on umbes 5 % lämmastikmonooksiidi kontsentratsioonist. Tulemus liidetakse ja esitatakse tavaliselt lämmastikoksiididena (NO_x) [20].

Viimaseks komponendiks, mida tavaliselt mõõdetakse ja mille norm on ka standardites enamasti esitatud, on süsivesinikud (HC). Süsivesinikud tekivad ebatäieliku põlemise tagajärjel. Nagu ka vingugaasi puhul, on põhjuseks hapnikupuudus või liiga madalad temperatuurid koldes. Kõik puidu põletamisel eralduvad süsivesinikud panustavad

kasvuhooneefekti tekkimisse. Negatiivselt mõjuvad süsivesinikud ka inimese hingamiselunditele [26].

1.8. Tõmme

Tõmbe olemasolu korstnas on ahju ja mistahes teiste kütteseadmete toimimise üks tähtsaim eeldus. Tõmbel on täita kaks olulist rolli. Esiteks juhtida põlemiseks vajalik hapnik kütuse juurde ning teiseks, viia tekkinud suitsugaasid lõõristiku kaudu korstnast välja. Tõmme tekib tänu kuuma suitsugaasi tekitatud rõhkude vahele. Gaaside voolamist põhjustav rõhk on leitav valemiga 1.4 [1]:

$$H_g = h(\gamma_{\tilde{o}} - \gamma_g), \tag{1.4}$$

kus H_g on gaasi staatiline rõhk mmH_2O;

h – vaadeldava gaasisamba kõrgus m;

γ_g – kuuma gaasi mahumass kg/m³;

$\gamma_{\tilde{o}}$ – ümbritseva õhu mahumass kg/m³.

Nagu valemist 1.4 näha, on staatiline rõhk ehk tõmme seda tugevam, mida suurem on suitsugaasi ja välisõhu mahumasside erinevus. Sarnaselt vedelikega, on soe õhk jahedamast õhust kergem ning tõuseb ülespoole. Asetades valemisse 1.4 korstna kõrguse ja nimetatud gaaside mahumassid, saame tulemuseks tõmbe ühikuga mmH_2O. SI süsteemi rõhuühikuks teisendatuna on 1 mmH_2O 9,81 Pa [27]. Selleks, et põlemine kütteseadmes toimuks normaalselt, peab korstna tõmme olema suurem kui lõõride ja kütteseadme sisetakistuste summa. Sisetakistuste summa iseloomustab hõõrdetakistust (rõhukadu), mis tekib suitsugaaside kokkupuutel lõõristikuga. Hõõrdetakistus on tingitud lõõride seinte karedusest. Lisaks lõõri seintele, põhjustavad rõhukadusid veel kolderest, siibrid ja lõõristiku ristlõike muutus ning pöörded selles. Normaalseks korstna tõmbeks loetakse umbes 7…15 Pa, mis peab olema tagatud isegi palavatel suvepäevadel. Kui minna täpsemaks, peab kütteseade olema projekteeritud vastavalt korstnale või vastupidi. Nimelt on süsteemi toimivuse seisukohalt ülioluline viimaste kokkusobivus. Näiteks vajab suure sisetakistusega paljulõõriline ahi suurema ristlõikega ja kõrgemat korstnat kui saunakeris. Samas ei ole ka liiga suur tõmme hea, sest sellisel juhul intensiivistub põlemine, mistõttu ei

pruugi tekkiv soojus salvestuda kohta, kuhu me soovime, vaid kantakse korstna kaudu välja. Vastupidiselt ebapiisavale tõmbele, on liiga suure tõmbe esinemise korral probleemi lahendamine mõnevõrra lihtsam. Nimelt saab tõmmet vähendada põlemisõhu piiramisega kolde või tuharuumi ukse abil. Samuti on kaubandusvõrgus saadaval ka nn tõmbemoderaatorid, mis on heaks mooduseks tõmbe piiramiseks nö automaatselt. Siinkohal peab ära mainima, et reguleerimine toimub üksnes negatiivses suunas ehk korstna tõmmet need tõsta ei suuda. Ehituslikult on tegemist korstna küljele või suitsulõõri paigaldatava vabalt liikuva klapiga, mis avaneb suurenenud tõmbe korral ja laseb lisaõhku korstnasse. Avanemine on määratud klapil asuva reguleeritava vastukaaluga [28].

Põhjustel, mida varasemalt kirjeldati, tekitab normaalsest suuremat tõmmet külmadel talvepäevadel suitsugaasi ja välitemperatuuri suur vahe. Veel üheks oluliseks faktoriks on aga tuul, mis tekitab korstna otsas imevjõu. Tuule poolt avaldatav rõhk on leitav valemiga [1]:

$$H = (k\gamma_{õ}V^2)/2g \approx (kV^2)/16, \quad (1.5)$$

kus H on tuule poolt pinnale avaldatav rõhk mmH_2O;

k – tegur, mis arvestab pinna paiknemist tuule suhtes, korstna otsal $k = 0{,}3$;

g – raskuskiirendus m/s^2;

V – tuule kiirus m/s;

$\gamma_{õ}$ – õhu mahumass kg/m^3.

Keskmisest mõnevõrra tugevam tuul (näiteks 10 m/s) põhjustab seega tõmbe suurenemise $\Delta H = (0{,}3 \times 10^2) / 16 = 1{,}88$ mmH_2O võrra, mistõttu normaalsel korstnal võib tõmme mitmekordistuda. Samas ei tohi mainimata jätta ka tuule vastupidist mõju. Tuule teel olevad takistused tekitavad keeriseid, mis võivad tekitada korstnas hoopis ülerõhu. Antud mõjude vähendamiseks on kehtestatud nõuded korstna kõrgusele katusepinnast ja paiknemisele sõltuvalt naaberhoonetest [1].

Alajaotist kokku võttes võib öelda, et tõmbel on kütteseadmete toimimise seisukohalt oluline roll. Tegureid, mis mõjutavad tõmmet ja samas ka lahendusi nende tekitatud probleemile, on palju. Antud magistritöö käigus ehitatud automaatikasüsteem on samuti üks võimalikest lahendustest.

2. PÕLEMISAUTOMAATIKA

2.1. Põlemisautomaatika ajalugu

Inimesed hakkasid lõket tegema juba 1,5 mln aastat tagasi. Seevastu esimene alge automaatikast tekkis alles 1849. aastal, mil F. P. Oliver leiutas puukütte pliidile põlemisõhku reguleeriva bimetalltermostaadi. Automatiseerimise alla võib lugeda ka 1873. aastal W. Johnsoni poolt leiutatud elektrilise visuaalset signaali näitava seadme, mis andis teada keldris asuva küttesüsteemi auruklappide reguleerimisvajadusest. W. Johnson oli asjast niivõrd vaimustuses, et jätkas katsetusi ja juba 1885. aastal patenteeris suruõhul töötava termostaadi, mis juba nimetatud auruklappe reguleeris. Esimene elektriline põlemisõhku kontrolliv termostaat patenteeriti 1886. aastal A. Butzi poolt. Termostaat kasutas patareipinget, et aktiveerida vedruga varustatud mootorit, mis liigutas õhuklappi [29].

20. sajandi alguses, peale termostaatide leiutamist, hakati valmistama erinevaid automaatseid süütesüsteeme. 1920-ndate aastate keskpaigaks olid küttesüsteemid muutunud juba suhteliselt odavateks ja töökindlateks, pakkudes inimestele palju rohkem mugavust, kuna neid polnud vaja pidevalt jälgida [29]. Selleks, et need süsteemid aga iseseisvalt töötaksid, oli tarvis veel palju ära teha. Umbes samal ajal riistvaralise poolega, hakkas kiiremini arenema ka automaatjuhtimine. Enne 1920-ndate aastate algust toimus protsesside juhtimine erinevate releede ja mootorite sisse- ning väljalülitamise teel. Peagi selgus, et taoline juhtimine tekitab siirdeprotsessides võnkumisi, mis kütteseadmete puhul põhjustasid järske temperatuurimuutusi ning mõjusid halvasti nende materjalile. Seetõttu leiti peatselt lahendus proportsionaalse regulaatori näol, millele lisandusid ka integraalsed ja diferentsiaalsed regulaatorid, mis kokku moodustavad PID-regulaatori [30].

Klassikaline juhtimise periood kestis kuni 1960. aastani. Järgmise suurema muutuse automaatjuhtimises põhjustas mikroprotsessortehnika areng [31]. 1960-ndate aastate alguses hakati kasutama arvutil põhinevaid regulaatoreid, mis mõõtsid andurite signaale, tehes arvutusi ja juhtides väljundsignaalide abil ajameid [32]. 1955. aastal algas kaasaegne automaatjuhtimise periood, mis kestab tänapäevani [31].

2.2. Põlemisautomaatika olulisus

Kuni 20. sajandi teise pooleni oli kütteseadmete automatiseerimise vajaduseks peamiselt mugavus. Sajandi teisest poolest alates hakati rohkem keskenduma kasutegurile ja tekkivale emissioonile. Puidu põletamisel tekkiva emissiooni probleem kerkis tõsisemalt esile 1980-ndatel aastatel. Peamiselt seetõttu, et 1970-ndatel tekkis energiakriis, mil õli hinnad tõusid ning eelistama hakati taas, peale paarikümneaastast pausi, puukütet. Suurimat muret tekitasid peenosakeste ja süsinikoksiidi kogused suitsugaasis. Näiteks USA-s hakati sellest ajast peale nõudma puidul põhinevate kütteseadmete sertifitseerimist, et vähendada ohtlike ühendite emissiooni atmosfääri [33]. Tööstuses tekkivad heitmed on tänaseks enamjaolt reguleeritud ning maksustatud. Ka eramajapidamiste ahjudest tekkivatele heitgaasidele on kehtestatud norme, mille hulka kuulub ka varasemalt mainitud Euroopa Liidu 1. jaanuaril 2010. aastal koostatud standard EN 15544. Selle peamiseks eesmärgiks on suurendada käsitööna ehitatavate ahjude kasutegureid ning tagada heitgaasis sisalduvate ühendite jäämine normi piiridesse [34]. Lisaks kütteseadmete sertifitseerimisele ning standardite järgi ehitamisele, on suureks saavutuseks biomassi põletamisel ka seadmete automatiseerimine. Hetkel on enamjaolt automatiseeritud tehases valmistatud kütteseadmed või vähemalt pakutakse seda lisavarustuses. Käsitööna valmistatud kütteseadmetele on automaatika paigaldamine suuresti veel niši toode. Võib arvata, et näiteks ahjude puhul on põlemisautomaatika kasutamine isegi olulisem kui katelseadmete puhul, sest lühikese aja jooksul on vaja põlemisel tekkinud soojus salvestada ümbritsevasse materjali. Põlemisprotsess on normaalse suurusega ahjude puhul küllaltki lühike ning kui isegi pool sellest on ebaefektiivne, kaotame suure hulga soojust. Katelde puhul kestab põlemine üldiselt mitmeid tunde ning kui mingil hetkel pole efektiivsus kõrge, siis suur osa kütuses olevast energiast saadakse sellele vaatamata salvestatud. Katla puhul pole ka siibri sulgemine oluline, sest enamus soojust on salvestunud akumulatsioonipaagis olevasse energiakandjasse. Ahju siiber peab aga saama suletud võimalikult kiiresti, et ei toimuks soojuse ärakannet korstnasse, see on ka tänapäeva mugavale inimesele üks suurim automaatika kasutamise argument.

Uuemad põlemisprotsessi juhtivad süsteemid reguleerivad nii põlemisõhku kui ka koldesse lisatavat kütuse kogust. Samuti on olemas ka automaatika süsteeme, mis reguleerivad kütuse mahtu ja pealevoolu ajastust vastavalt sellele, kui palju soojust hetkel vajatakse. Biomassi

põletavatele kütteseadmetele automaatika arendamine on oluline, et inimestel ei tekiks tunnet, et fossiilsete kütuste kasutamine soojusenergia saamiseks on ainus võimalus. Automaatikaga on võimalik vähendada kütusele kuluvat raha, muuta süsteem töökindlamaks ning vähem hooldust nõudvaks ja kergemini käsitletavaks. See tõstaks inimestes kindlustunnet, et ka biomassi põletamine on mugav ja soodne [35]. Euroopas on saadaval juba tehastes valmistatud kütteseadmed, mis omavad täisautomaatseid lahendusi (nö ‚*load and leave'*). Need on aga näiteks isegi tehases valmistatud keskküttepliitide ja -kaminate puhul veel suhteliselt uudsed lahendused, kuna mõned aastad tagasi polnud need veel turul saadavad. Taoliste kütteseadmete arengut pidurdas pikalt ka standardite puudumine – kuidas neid testida ja sertifitseerida. Käsitööna valmistatud kütteseadmete (ahjud, pliidid jne) automaatikal küll sellist piiravat tegurit pole olnud, kuid siiski pole need eriti populaarseks saanud. Selle peamisteks põhjusteks võivad olla kontrolli puudumine käsitsi valmistatavate seadmete ehitamise üle ning ühtsete normide puudumine kvaliteedi osas. 2014. aastal olid täisautomaatsete lahendustega tehase kütteseadmed Euroopas juba olemas, kuid näiteks puudusid need USA-s, kus polnud vastavaid sertifikaate. Põhjapanevate järelduste tegemiseks automaatika lahenduste toimivusest, milleks võib olla nii traditsiooniline bimetall termostaat kui ka tänapäeval aina populaarsemaks muutuv elektrooniliste andurite ja arvuti koostoimiv süsteem, tuleb teha külg-külje kõrval testimisi nii automaatikaga kui ka ilma. Taoline testimise standard on olemas näiteks Inglismaal. Selle järgi ei eristata testimisel kütteseadmeid mitte tüübi (pliit, katel või ahi) vaid hoopis selle järgi, kas tegemist on automatiseeritud või manuaalselt töötava seadmega. Olenevalt sellest, määratakse ka proovikütmiste arv, mis manuaalse kütuse etteandega ja põlemisõhu kontrolliga ning loomuliku tõmbega kütteseadme puhul on 5 testi, automatiseeritu puhul aga kõigest 3 [36].

Kokkuvõtvalt võib öelda, et antud valdkond on viimastel aastatel hoogsalt arenema hakanud, kuna tekkimas on seaduslikud regulatsioonid ning kaugel pole ka hetk, kus inimese osalus biomassil töötava kütteseadme opereerimisel on minimaalne. See välistaks inimese tegutsemisest põhjustatud vead, kuna arvuti kontrolliks kogu põlemisprotsessi. Kuna arvutid on tänapäeval juhtimas juba enamusi koduseadmeid, siis miks ei võiks arvuti erinevate andurite ja täiturite abil reguleerida põlemisprotsessi, anda märku kütuse juurde lisamise vajadusest, millal tuhka eemaldada jne. See kõik kehtib halupuudega kütmise korral. Pelletikatelde puhul pole vaja muretseda isegi mitte kütuse juurde lisamise ega tuhaärastuse pärast, kuna kõik toimub automaatselt.

Valdkonna arengule aitaks oluliselt kaasa ka põlemisautomaatika ühendamine internetiga. See näiteks võimaldaks tehases valmistatud seadmete inseneridel jälgida, kuidas seadmed toimivad ning kuidas on neid kasutatud ning teha sellest lähtuvalt parandusi ja arendada paremaid tooteid. Veel enam, see hariks ka teisi kasutajaid ning paneks neid mõtlema kas biomassi põletavad kütteseadmed on nii ebamugavad kasutada. Kütteseadmetel, mis oleksid võimelised mõõtma ja edastama tarbitud soojusenergia näite, võiks olla õigus taastuvenergia toetustele just nagu päikesepaneelidel või maasoojuslahendustel. Riiklike taastuvenergia toetuste näol oleks ka seadmete tasuvusaeg lühem ja paneks inimesi neid ostma ja valdkonna arenema. Sellised toetusprogrammid aitasid ju näiteks päikesepaneelide tööstuse jalule. Miks ei võiks sama juhtuda ka halu-ja pelletiküttel töötavate seadmetega [37]. Kokkuvõtvalt ei olegi automaatika siinjuures kõige tähtsam, vaid oluline on leida viis, kuidas panna inimesed loobuma vanadest mitteefektiivsetest ja saastavatest kütteseadmetest. Automaatika tundub hetkel olema parim idee eestvedaja, kuna elektroonika- ja infoühiskond võimaldab seda.

2.3. Tatarek põlemisautomaatika Ihaste ahju näitel

Peale idee tekkimist, projekteerida ja ehitada ahjus toimuva põlemisprotsessi juhtimiseks automaatika, hakkas autor uurima kaubanduses olemasolevaid seadmeid. Internetis vastavasisulisi otsinguid tehes selgus, et ahjudele mõeldud põlemisautomaatikat pakuvad vähesed tootjad. Otsinguga tuli esmalt esile põlemisautomaatikat tootev ja turustav Poola firma Tatarek. Saksamaal ja Austrias on samuti firmasid, kes ahjudele selliseid süsteeme pakuvad, kuid infot seadmete kohta on raske leida, sest kodulehtedel ei ole üldiselt seadmete manuaale saadaval. Tatareki puhul on kodulehel kõigi pakutavate seadmete manuaalid saadaval mitmes eri keeles. Nende manuaalide uurimine andis esmase ülevaate, kuidas antud seadmed töötavad. Lühidalt toimub põlemisprotsessi juhtimine põlemisõhu reguleerimise abil. Põlemisõhku reguleeritakse silindrilise õhuklapi abil, muutes selle avatust. Õhuklapi liigutamine toimub vastavalt tööfaasidele. Nimelt kogu põlemisprotsess on jagatud faasideks, mida Tatareki RT8OS-G puhul on kokku näiteks üheksa. Seadistusega on määratud igale faasi algusele klapi avatuse protsent. Faaside pikkus sõltub koldetemperatuurist, mida mõõdetakse K-tüüpi termopaariga. Veel on seadistusega määratud, millistel temperatuuridel toimub eelnevast faasist järgmisesse minek.

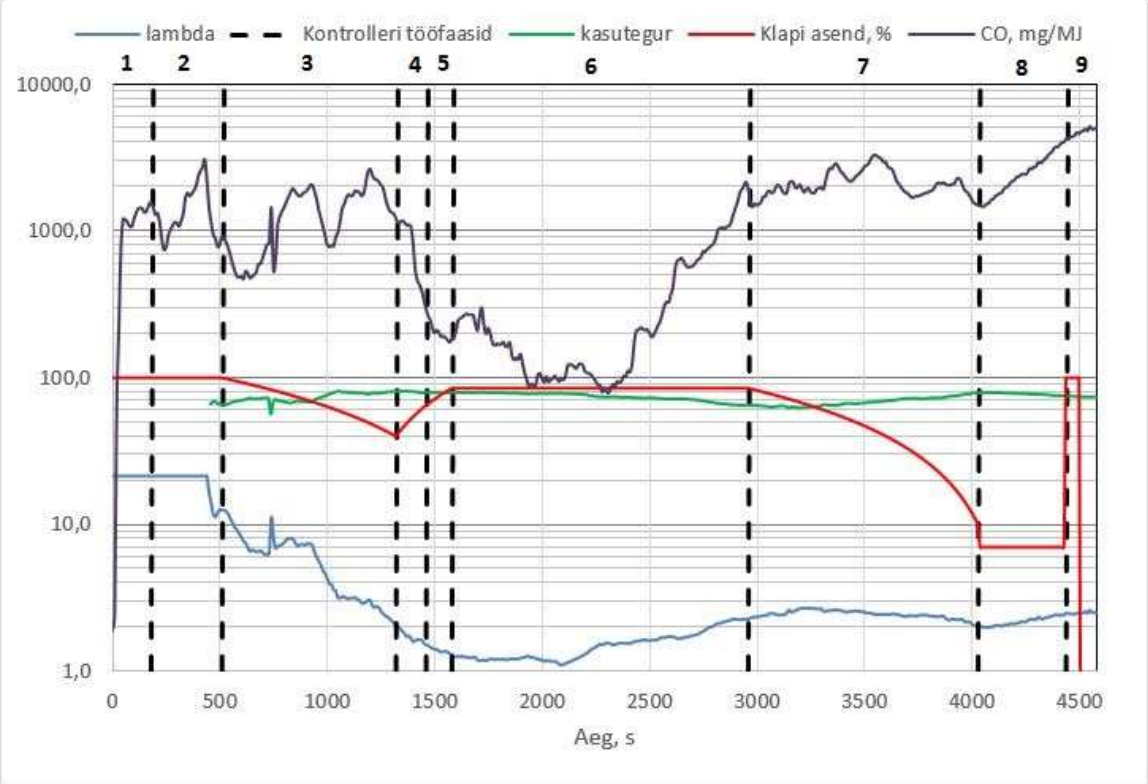
Kokkuvõtvalt põhineb sellistel seadmetel reguleerimine kolde temperatuuri tagasisidel ja oluline on kasutuseelne seadistus.

Tatareki põlemisautomaatika uurimise kasuks rääkis ka fakt, et mitmed Eesti firmad tegelevad antud seadmete edasimüügiga ja paigaldusega. Seega oli suur tõenäosus leida nimetatud automaatikal töötav kütteseade ja uurida seda lähemalt. Seoses kaasüliõpilase lõputööga, tekkiski võimalus osaleda Tatarek RT8OS-G põlemisautomaatikat omava ahju suitsugaasi mõõtmisel. Nimetatud ahi on valminud Tartumaal Ihastes ahjumeistri Lauri Lõhmuse käe all. Antud ahjule sooritati suitsugaasi mõõtmist juba mitmendat korda, ning põlemisautomaatika oli seadistatud eelnevatele mõõtmistulemustele tuginedes. Seega toimis seade veatult kogu põlemisprotsessi jooksul. Saamaks aimu, kuidas seade põlemisprotsessi juhib, koguti andmeid terve protsessi kestel kuni ahju kinni panemiseni. Lisaks suitsugaasi analüsaatori poolt mõõdetavatele suurustele, salvestati ka põlemisautomaatika juhtseadme ekraanil toimuvat videokaameraga. Nimelt on antud seadme uurimise seisukohalt suureks miinuseks see, et andmeid ei ole võimalik salvestada ja hiljem analüüsida. Seade on olenevalt seadistusest võimeline salvestama ainult 6 h pikkuse põlemisprotsessi kõvera (temperatuuri koldes) ja esitama seda graafikuna väiksel vedelkristall ekraanil (joonis 2.1).

Joonis 2.1. Tatarek RT8OS-G kasutajaliides [38]

Ekraan koos nuppudega moodustab kasutajaliidese, mille abil saab teha seadistusi ja jälgida põlemisprotsessi ajal erinevaid parameetreid. Ekraanil on nähtav põlemisprotsessi kõver

koos kõikide tööfaasidega, temperatuur koldes, õhuklapi avatus protsentides ja hetkel käimasolev faas. Kuna loetletud parameetreid seade ei salvesta ja puudub ka arvutiga ühendamise võimalus, talletati andmed õhuklapi asendist, kolde temperatuurist ja tööfaasidest videokaamera abil. Videokaamera ja heitgaasianalüsaatori abil kogutud andmed on pandud omavahel ajaliselt klappima ja on esitatud joonisel 2.2.



Joonis 2.2. Ihaste ahju katsetulemused

Joonise y-telg on vormistatud logaritmilises skaalas, et parameetrite, nagu õhuklapi avatuse, liigõhuteguri, kasuteguri ja vingugaasi sisalduse omavaheline sõltuvus oleks ajas võrreldav. Vertikaalsete katkendjoontega on eraldatud üheksa tööfaasi. Tööfaaside kirjeldus ja konkreetse näite seadeväärtused on järgmised:

F1 – Käivitusfaas. Algab ahjuukse sulgedes, peale seda kui kütus on koldesse asetatud ja süüdatud. Faasi pikkus on määratud ajaliselt ja õhuklapp on 100 % avatud.

F2 – Soojenemise faas. Õhuklapp on 100 % avatud, kusjuures faasides F1 ja F2 klapi asendit seadistada ei saa.

F3, F4, F5 – Temperatuuri tõusmise faasid. Faaside algused on määratud kolde temperatuuriga (100 °C, 350 °C, 500 °C). Õhuklapi asend F3 alguses on 100 %, sest F2 puhul seda muuta ei saa. F4 ja F5 puhul on õhuklapi asend määratud vastavalt 40 % ja 65 %.

F6 – Põlemise faas. Oodatakse kolde maksimaalset temperatuuri. Õhuklapi asend on 85 % kogu faasi kestel, sest puudub võimalus seadistada klapi asendit F7 alguses.
F7 – Temperatuuri langemise faas. Faasi algus on määratud temperatuuride vahega. Antud juhul, kui temperatuur langeb 200 °C madalamale koldes mõõdetud maksimaalsest, käivitub seitsmes faas.
F8 – Süte faas. Faasi algus on seadistatud temperatuuriga 500 °C ja õhuklapp on faasi alguseks avatud 7 %. Klapi sulgemine 85 % - 7 % toimus faasis seitse. Faasi kestvus on määratud ajaliselt.
F9 – Suitsugaasi lõõristikust eemaldamise faas. Selleks tehakse ettemääratud ajaks (antud juhul 1 minut) õhuklapp 100 % lahti ja seejärel sulgetakse [39].

Analüüsides joonisel 2.2 esitatud graafikut selgus, et põlemisautomaatika seadistus on hea, kuid mitte suurepärane. Nimelt saaksime põlemise kvaliteeti parandada eelkõige faasides kuus ja seitse. On näha, et kuues faas on ajaliselt liiga pikk ning kuna õhuklapp on konstantselt avatud 85 %, saab põlemine liiga palju õhku faasi teises pooles. Sellega kaasneb kasuteguri langemine ja suitsugaasi sisalduse tõus. Et muuta liigõhuteguri kõverat sujuvamaks, peaksime seadistama seitsmenda faasi alguse varasemaks. Samuti võiks kaaluda faasis kuus avada õhuklappi rohkem kui 85 %, sest liigõhutegur langes kohati väärtusele 1,1. See võis põhjustada kõrgemat vingugaasi osamahtu suitsugaasis.

Sooritades korduvaid suitsugaasi mõõtmisi ja tulemusi graafikul analüüsides, on võimalik saavutada väga hea põlemisautomaatika seadistus. Siiski on sellistel kolde temperatuuri tagasisidel põhinevatel seadmetel autori silmis üks oluline puudus, nimelt seadistus ei pruugi enam sobida olukordadele, kus põlemistingimused on muutunud. Eelnevas põhijaotises on käsitletud korstna tõmbe mõju ja leitud arvutustega põlemiseks vajalik õhuhulk kg kütuse kohta. Selgus, et näiteks tuul ja muutuv välitemperatuur võib põhjustada mitmekordset tõmbe erinevust. Seoses sellega, muutub põlemises osalev õhuhulk ja tavaoludes tehtud põlemisautomaatika seadistus ei ole enam sobiv. Ka kütusekogus koldes mõjutab oluliselt põlemiseks vajaminevat õhuhulka. Seetõttu peaks koldesse asetama alati samapalju kütust kui seda seadistamisel tehti ja teist liiki puitu kasutades ei tohi ära unustada mahumassi erinevust. Loetletud tegurite mõju suurust põlemisautomaatikale tuleks täiendavalt uurida katsete sooritamise abil.

3. HAPNIKUANDURI TAGASISIDEL PÕHINEV PÕLEMISAUTOMAATIKA

3.1. Automaatika projekteerimine

Enne põlemisautomaatika projekteerimist uuriti hetkel ahjudele kaubanduses saadaval olevaid põlemisautomaatika seadmeid. Lähemalt uuriti firma Tatarek toote RT08-G tööpõhimõtet ja seadistamise võimalusi. Selgus, et selliste kolde temperatuuri tagasisidel põhinevate seadmete miinuseks on korduv seadistamise vajadus, millest kokkuvõttes ei pruugi kasu olla, sest seadistus ei tule toime tõmbest või kütusekogusest tingitud põlemisõhu muutusega. Sellest probleemist lähtuvalt tekkis idee projekteerida suitsugaasis sisalduva hapniku osamahu tagasisidel põhinev põlemisautomaatika. Seega tuli esmalt mõelda, kuidas ja millega saaks mõõta hapniku osamahtu suitsugaasis. Kuna autoril oli olemas sisepõlemismootorite kütusesegu jälgimiseks mõeldud mõõteseade, mis koosnes autotööstuses kasutatavast hapnikuandurist ja selle juhtseadmest, otsustati katsetada selle sobivust ahjus biomassi põlemisel tekkiva suitsugaasi hapniku osamahu mõõtmiseks. Katse metoodikat ja tulemusi on täpsemalt kajastatud järgmises alajaotises. Lisaks olemasolevale hapnikuandurile tuli soetada ka mitmeid teisi seadme ehitamiseks vajaminevaid komponente, nagu näiteks juhtseade, õhuklapp, mootor klapi liigutamiseks ja temperatuuriandur. Nendega aga nimekiri ei piirdu, sest tarvis läks ka moodulit mootori juhtimiseks ning analoog-digitaalmuundureid (ingl. *Analog to Digital Converter* – ADC) hapniku- ja temperatuurianduri väljundsignaalide juhtseadmele sobivaks teisendamiseks. Kõikide nimetatud riistvaraliste komponentide projekteerimise käigus vajaminev informatsioon on koondatud käesolevasse põhijaotisse.

3.2. Ahju suitsugaasis sisalduva hapniku mõõtmine autotööstuses kasutatava hapnikuanduriga

Selgitamaks välja, kas autotööstuses kasutatava hapnikuanduriga on võimalik mõõta ka ahjus halupuude põletamisel tekkivat suitsugaasi, on läbi viidud proovikütmine Eesti

Maaülikooli katlalaboris asuva pliidiga. Pliidi kasutamine ahju asemel rolli ei mängi, sest kasutatav kütus on sama ja põlemistingimused ei erine teineteisest oluliselt. Tegelikult võiks isegi küsida, kas antud andur sobib mõõtma biomassi põletamisel tekkivat suitsugaasi. Erinevalt auto väljalasketorustikus liikuvast heitgaasist on ahju lõõristikust korstnasse väljuv suitsugaas oluliselt madalama temperatuuri ja väiksema liikumiskiirusega. Sisepõlemismootori heitgaasi temperatuur enne katalüsaatorit (koht, kuhu tavaliselt paigutatakse hapnikuandur) on tavaliselt vahemikus 600…700 °C [40]. Kõrge kasuteguriga ahju puhul on see aga 100…200 °C. Heitgaaside liikumiskiirus auto summutis on suurem tänu väiksemale toru läbimõõdule ja suuremale mahule, mis on tingitud nafta kõrgest süsiniku sisaldusest (vajab põlemiseks oluliselt rohkem õhku kui biomasskütus). See, kas nimetatud tegurid mõõtmistulemustele mõju avaldavad, selgub katsetulemustest.

Katses uuritav hapnikuandur (Bosch LSU 4.9) on osa tootja Innovate mõõtekomplektist mtx-l (joonis 3.1).

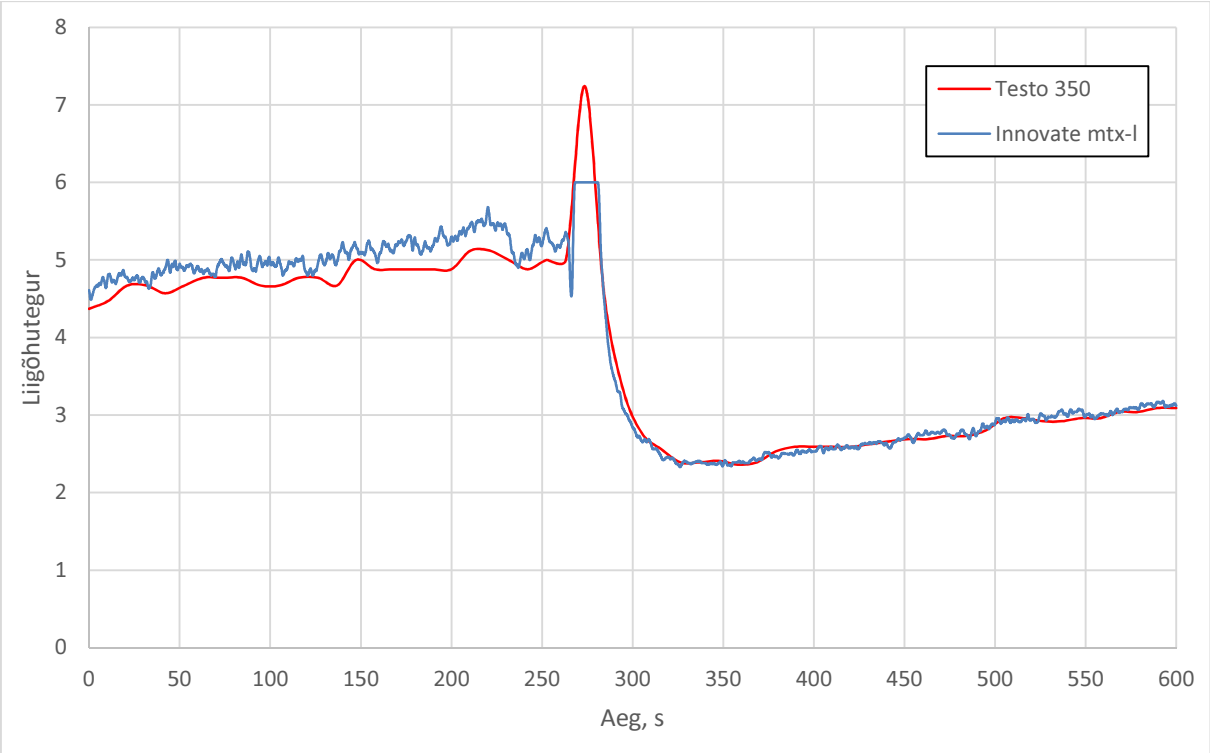
Joonis 3.1. Mõõtekomplekt Innovate mtx-l

Tegemist on lineaarse ehk laiaribalise tsirkooniumanduriga, mille tööpõhimõtet on kirjeldatud alajaotises 3.4. Komplekti kuulub lisaks andurile ka kontroller, mis juhib anduri tööd ja võimaldab vastava tarkvaraga salvestada mõõtmistulemusi arvutisse. Mõõtesagedus

katses kasutatud mtx-l komplektil on 12 korda sekundis. Heitgaasianalüsaatori mõõtesageduseks valiti aga katse sooritamisel 1 kord 10 sekundi jooksul. Bosch LSU 4.9 mõõtetäpsus on näiteks liigõhuteguri λ = 1 puhul ± 0,007 ja λ = 1,7 korral ± 0,05 [41]. Kõrgematel väärtustel pole tootja andmeid esitanud, mis pole ka antud olukorras tähtis, kuna meid huvitavad liigõhuteguri madalamad väärtused. Heitgaasianalüsaatori Testo 350 mõõtetäpsus on kasutusjuhendis ± 0,02 O_2% terves mõõteulatuses [42]. Vaatamata erinevatele ühikutele on seadmete mõõtetäpsused hinnanguliselt sarnased.

Antud uurimuse metoodika seisneb võrdlusmõõtmise sooritamises ja selle tulemuste analüüsis. Võrdluseks kasutatakse heitgaasianalüsaatori Testo 350 mõõtetulemusi. Enne mõõtmist on oluline, et andurid oleks kalibreeritud. Heitgaasianalüsaator Testo 350 on seadistatud selliselt, et enne igat mõõtmist teeb seade seda automaatselt. Uuritav hapnikuandur kalibreeriti vastavalt manuaalile enne esmakordset kasutamist. Seadme juhend soovitab igapäevasõiduki puhul andurit kalibreerida 20 000 miili läbimisel või korra aastas. Kui on tegemist võidusõiduautoga, kus kütusesegu on rikkam, tuleb kalibreerida tihedamini. Kalibreerimise mõte on mtx-l puhul kompenseerida anduri kulumist [43]. Võimalikult täpsete tulemuste saamiseks paigaldati proovikütmisel mõlemad hapnikuandurid suitsulõõris samale kaugusele küttekoldest, et vältida mõõtmistulemuste erinevusi, mida võib põhjustada lõõristiku ebatihedus. Olulisimaks antud katse sooritamise juures oligi tagada mõlema hapnikuanduri mõõtepunktis samasuguse hapnikusisaldusega suitsugaas. See, millist liiki ning kui suure niiskusesisaldusega puitu põlemiseks kasutati, antud katse puhul oluline ei olnud.

Joonisel 3.2 on esitatud proovikütmisest 600 sekundiline lõik, mille jooksul lisati küttekoldesse ka täiendav kogus küttepuid. Küttepuude lisamisega saavutati liigõhuteguri muutumine, mis võimaldab hinnata mõõtetulemuste kokkulangevust mõõteulatuse lõikes. Mtx-l komplekti tarkvara salvestab liigõhuteguri väärtusi kuni 6-ni (17,5 O_2%), mis on nähtav ka joonisel 3.2 esitatud graafikul ajavahemikus 250-300 sekundit. Salvestusvahemik on tõenäoliselt piiratud tänu mõõtetäpsusele, mis langeb, lähenedes atmosfääri hapniku osamahule 21 %.



Joonis 3.2. Võrdlusmõõtmise tulemused

Uuringu tulemusena selgus, et autotööstusest pärineva laiaribalise hapnikuanduriga on võimalik mõõta hapniku osamahtu biomassi põletamisel tekkivas suitsugaasis. Metoodika sobivust kinnitab see, et võrdlusmõõtmine Testo 350-ga andis sarnaseid tulemusi. Mõõtetulemustes esines erinevusi kõrgematel liigõhuteguri väärtustel, mis ei ole olulised, sest kütteseadmete optimeerimise seisukohalt huvitavad meid madalamad, enamasti <2 liigõhutegurid. Tuginedes seadmete mõõtetäpsustele, ei saa üheselt kinnitada, kumb võrdlusmõõtmises osalenud seade andis tõele lähedasemaid mõõtetulemusi. Sellele vaatamata on meile olulises piirkonnas anduri mõõtevõime enam kui piisav, et kasutada seda tagasisidena põlemisautomaatika projekteerimisel/ehitamisel. Lisaks sellele saab uuritud hapnikuanduri abil suitsugaasis mõõdetud hapniku osamahu abil hinnata ka mürgiste komponentide sisaldust. Suitsugaasis sisalduvate mürgiste komponentide ja liigõhuteguri (leitav hapniku osamahust) omavahelisi seoseid on käsitletud alajaotises 1.6. Seega, kui eesmärgiks ei ole täpsed mürgiste komponentide osamahud suitsugaasis, vaid põlemise üldine kvaliteet, ei ole otsest vajadust kasutada oluliselt kallimaid seadmeid – suitsugaasi analüsaatoreid.

Mõõtevõime ei ole aga ainuke näitaja, mis kinnitab uuritava hapnikuanduri sobivust hapniku osamahu mõõtmiseks biomassi põletamisel tekkivas suitsugaasis. Et anduril oleks

perspektiivi, on oluline ka selle vastupidavus vastavas keskkonnas. Bosch annab LSU seeria laiaribaliste hapnikuandurite eeldatavaks elueaks 160 000 km ja 10 aastat. Seega, kui auto liiguks keskmise kiirusega 100 km/h, oleks anduri elueaks 1600 tundi. Auto väljalasketorustikus vähendavad anduri eluiga oluliselt õli ja jahutusvedelik, mis satuvad sinna katkise või kulunud mootori tõttu. Anduri eluiga vähendab ka pliid sisaldava bensiini kasutamine (kuni 8 korda sõltuvalt plii sisaldusest) [44]. Kuna ahju suitsugaasis selliseid ühendeid ei ole, võiks anduri eluiga jääda samuti umbes 10 aasta kanti arvestades, et kütame ahju aastas sajal päeval ja kütmine kestab 1,6 tundi. Loomulikult võib biomassi suitsugaasil olla andurile teisi kahjulikke mõjusid, mida auto heitgaasid ei oma. Olgu nendeks suitsugaasi madalam temperatuur või suurem tahmasisaldus. Täpsemaid järeldusi saab teha alles peale pikemaid katsetusi. Antud töö käigus on andurit kasutatud 20 + tundi. See aeg ei ole aga andurile märgatavat negatiivset mõju avaldanud.

3.3. Juhtseade Raspberry Pi

Raspberry Pi puhul on tegemist odava krediitkaardi suuruse arvutiga, mille loomise idee tekkis 2006. aastal Suurbritannias Cambridge Ülikoolis. Loomise peamiseks põhjuseks oli kurb tõsiasi, et võrreldes 1990. aastatega vähenes pidevalt arvutiteaduse tudengite arv ning nende tase. Arvutid muutusid üha kallimaks ja võimsamaks ning seega sooviti luua seade, mis oleks piisavalt odav ja suhteliselt lihtne ka neile, kes süvendatud programmeerimisega varasemalt kokku puutunud polnud. Seadme põhiliseks eesmärgiks oli tutvustada arvuti tööprotsesse ja programmeerimist noortele üle kogu maailma. Seega on Raspberry Pi ideaalseks vahendiks igas vanuses inimestele arvutimaailmaga tutvumiseks ning programmeerimiskeelte *Scratch* ja *Python* õppimiseks. 2012. aastal saadi esimene mudel (Mudel B) tootmiskõlblikuks ning järgneva kahe aastaga suudeti neid müüa üle 2 miljoni eksemplari.

Seadet on võimalik ühendada nii arvutimonitori kui teleriga ning sellega töötamiseks on lisaks vaja vaid klaviatuuri ja hiirt. Võimalik on teha kõikvõimalikke toiminguid, mida tavalise arvutigagi, alustades interneti kasutamisest ning lõpetades kõrge kvaliteediga videote vaatamisega. Samuti saab edukalt tabeli- ja tekstitöötlusi teha ning mänge mängida.

Raspberry Pi on võimeline suhtlema ka välismaailmaga, mistõttu on seda kasutatud edukalt ka mitmesugustes digitaalsetes seadmetes (beebimonitorid, digitaalsed ilmajaamad jne).

Raspberry Pi mudelitest on saadaval Pi 2 Model B, Pi 3 Model B, Pi Zero, Pi 1 Model B+ ja Pi 1 Model A+ [45]. Käesolevas töös on kasutatud põlemisautomaatika juhtseadmena mudelit Pi 2 Model B (joonis 3.3).

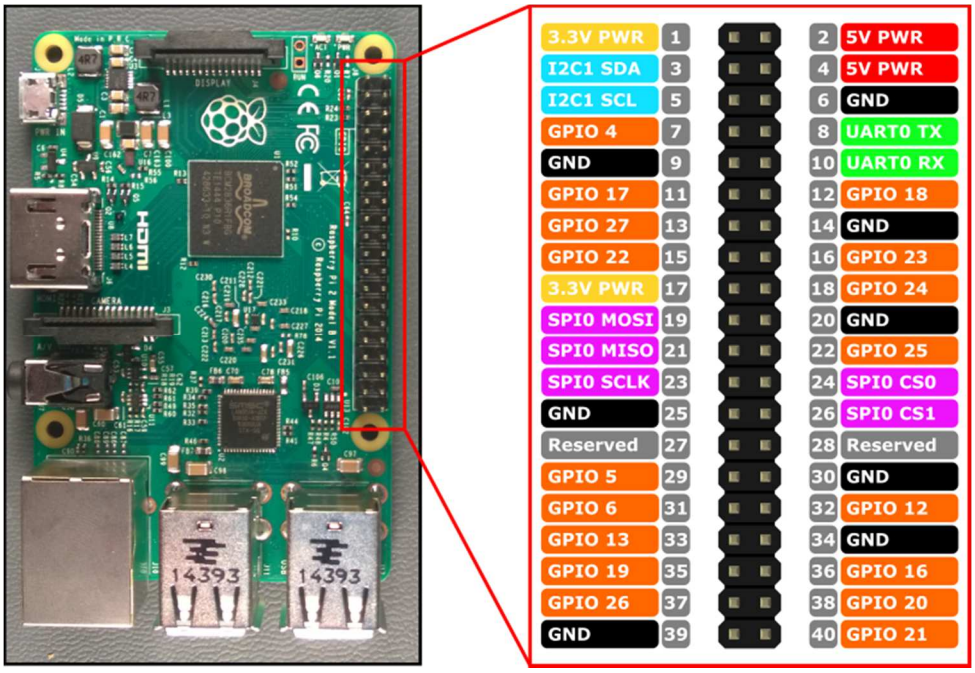
Joonis 3.3. Raspberry Pi 2 Model B omavalmistatud pleksiklaasist alusel

Tegemist on 2015. aasta veebruaris välja tulnud mudeliga, mis asendas varasema Pi 1 Model B+. Välimuselt näevad nad samasugused välja, kuid võrreldes vanema mudeliga on uuemal suurem mälumaht (1 GB RAM) ning võimekam protsessor (900 MHz taktsagedusega ARMv7). Lisaks on mudelil:

- 4 USB sisendit;
- 40 GPIO kontakti;
- HDMI videoväljund;
- Ethernet port;
- kombineeritud 3,5 mm audioväljund ja komposiitvideo signaal;
- kaameraliides (CSI);
- ekraaniliides (DSI)
- mikro SD mälukaardi pesa
- VideoCore IV 3D graafika.

Antud seade sobib ideaalselt koolides kasutamiseks, eelkõige oma universaalsuse tõttu [45]. Käesoleva projekti jaoks on tegemist ehk liigagi võimeka mudeliga, mille oleks võinud asendada ka mõne muu arendusplaadiga. Siiski on valitud Pi 2, sest tänu Raspberry populaarsusele on internetis saadaval palju informatsiooni ning selle võimekus on piisav, et tulevikus kasutada seda ka teiste ideede realiseerimisel.

Käesoleva projekti realiseerimiseks oli oluline piisavate sisendite ja väljundite arvu olemasolu, et juhtida samm-mootorit ning lugeda informatsiooni hapniku- ja temperatuurianduritelt. Sellega sai Raspberry Pi 2 oma 40 laiaotstarbelise sisend-väljund viiguga hakkama ilma ühtegi lisaplaati kasutamata. Lisaplaadi, nagu näiteks *Gertboard* vms, kasutamine on Raspberry Pi puhul siiski õigustatud, sest GPIO viigud ei oma ülepinge kaitset. GPIO viikudel on kaks võimalikku pingenivood: kõrge ja madal ehk 3,3 V või 0 V. Seega, kui viikudele peaks sattuma kõrgem pinge kui 3,3 V, on suur oht kahjustada vastavaid ahelaid või koguni rikkuda kogu seade. Ettevaatlik tuleb olla ka 5 V pingega GPIO päise kahel viigul. GPIO päise viikude skeem on esitatud joonisel 3.4.



Joonis 3.4. Raspberry Pi 2 Model B GPIO pistiku paiknemine ja viikude skeem [46]

Nagu jooniselt 3.4 näha, on viigud topelt nummerdatud. Viigud on nummerdatud 1 – 40 vastavalt füüsilise paiknemise järgi trükkplaadil või GPIO programmeeritavate sisend-

väljund viikude järgi. Koodi kirjutades tuleb alati defineerida, millist numeratsiooni kasutatakse – kas vastavalt BOARD või BCM. Näited selle kohta on jälgitavad lisades 1 – 5.

Lisaks programmeeritavatele sisend-väljund, maandus (GND) ja pinge (3,3 V ja 5 V) viikudele, on GPIO pistikus ka teisi andmesideks mõeldud viike. SPI (*Serial Peripheral Interface*) andmeside standardil on kasutusel viigud MOSI, MISO, SCLK, CS0 ja CS1. Jadaliidest SPI on kasutatud käesolevas töös ADC vahendusel hapnikuanduri informatsiooni vastuvõtmiseks. Sellele liidesele on iseloomulik andmete edastamine seadmete vahel ülem-alam (*master-slave*) režiimis. Andmete saatmine ja vastuvõtmine toimub samal ajal [47]. Teisi andmeside standardeid, nagu UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) viikudega (Tx, Rx) ja I²C (*Inter-Integrated Circuit*) viikudega (SDA, SCL), antud töös kasutatud ei ole.

Veel üks kasulik asi, mida Raspberry Pi omab, on *Ethernet* port. Kuigi antud projekti puhul kasutati Raspberry Pi-ga töötamisel enamasti HDMI väljundisse ühendatud monitori, USB klaviatuuri ja hiirt, tuli ette olukordi, kus nimetatud port oli vajalik. *Ethernet* pordi ja võrgukaabli abil saab tekitada ühenduse näiteks sülearvutiga. Antud võimalus tuli kasuks seadmega ringi liikudes (põlemisautomaatika katsetamisel teistel objektidel), et mitte monitori jms kaasas kanda. Selleks, et Raspberry Pi-ga oleks võimalik ühendust üle *Ethernet* pordi luua, tuleb ühendus seadistada. *Windowsi* keskkonnas saab ühenduse luua näiteks programmiga *Remote Desktop Connection*. Lisaks sellele on loomulikult *Ethernet* pordi kaudu võimalik Raspberry Pi-d ka internetiga ühendada.

Toite saab Raspberry Pi läbi mikro USB pesa. Toiteadapter peaks võimaldama minimaalselt voolu 500 mA @ 5 V. Kui aga kasutada mitmeid USB seadmeid, kaameraliidest ja varustada väliseid seadmeid läbi GPIO pistiku, on soovitav kasutada 2000 mA toidet [48]. Siinkohal on tähtis nimetada, et GPIO sisend-väljund viikude lubatud summaarne voolutarve on 50 mA. Üksikuid viike on võimalik seadistada 2…16 mA, vaikeväärtus on 8 mA [49].

Andmemahtu on Raspberry Pi-l just niipalju kui suurt mikro SD kaarti kasutatakse. Kui on vajadust suurema andmemahu järgi kui SD kaardid võimaldavad, saab kasutada ka välist USB pesaga kõvaketast. Kõvaketta toite peab loomulikult lahendama iseseisvalt, sest Raspberry USB pesa nii suuri voolutarvet ei võimalda. Käesolevas töös on kasutatud mikro SD kaarti suurusega 16 GB. Et operatsioonisüsteemi *Raspbian* kasutada, peaks andmemahtu

olema vähemalt 8 GB. Seadmel pole sisemist andmemahtu ning operatsioonisüsteem tuleb alla laadida ja paigaldada SD kaardile, mida on tehtud ka antud töös. Võimalus on muidugi ka osta mälukaart, millele on see juba paigaldatud [48].

3.4. Hapnikuandur

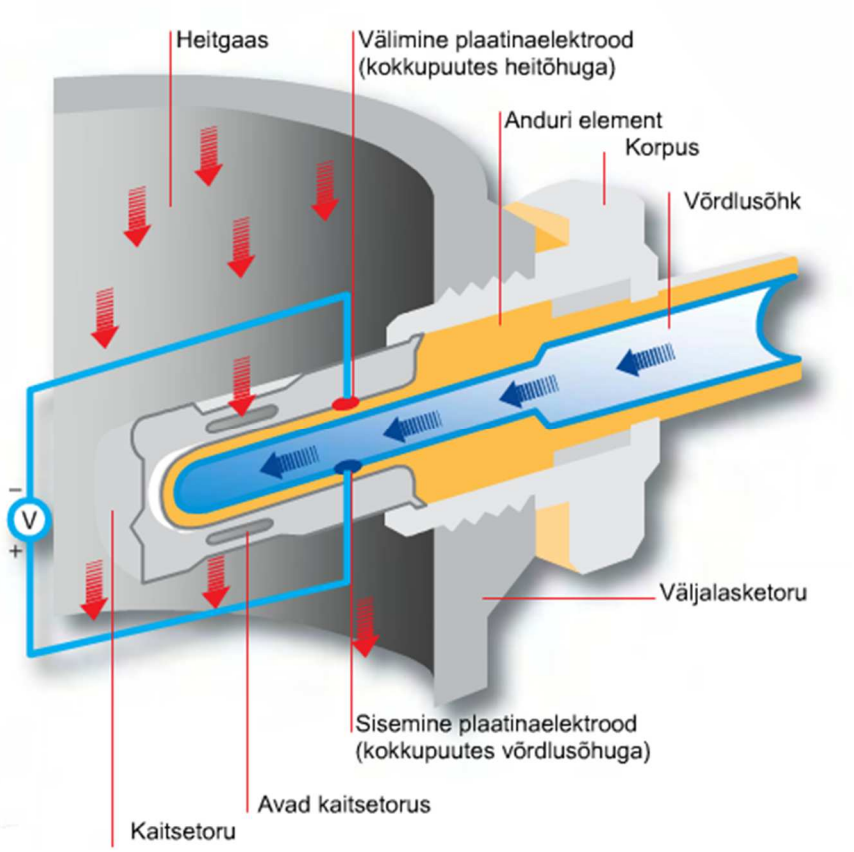
Antud töös ehitatud põlemisautomaatika põhineb suitsugaasis sisalduva hapniku osamahu mõõtmisel. Seega on igati paslik kirjutada hapnikuandurite ajaloost, nende tüüpidest ja tööpõhimõtetest. Kuna hapnikuandurite peamine kasutusvaldkond on sõidukite heitgaasis sisalduva hapniku osamahu määramine, on informatsioon nende kohta paljuski seotud autotööstusega. Ka käesolevas töös uuritud ja ahju põlemisautomaatika osana kasutatud hapnikuandur on mõeldud mõõtma sõidukite heitgaasis sisalduvat hapnikku. Konkreetsemalt on tegemist Bosch LSU 4.9 laiaribalise hapnikuanduriga, mis on osa mõõtekomplektist Innovate mtx-l. Sellest, mis on laiaribaline hapnikuandur, on kirjutatud antud alajaotise edasises osas.

Lambdaandurit on vaja selleks, et mõõta hapniku osamahtu heitgaasis. See on heaks põlemisprotsessi kvaliteedi näitajaks ja võimaldab jälgida kütuse segu koostist. On olemas ideaalne kütuse segu ehk mitu kilogrammi põlemisõhku on vaja ühe kilogrammi kütuse põletamiseks. Kütuse liigiti on see erinev. Bensiini puhul on see näiteks 14,7:1. Seda ideaalset suhet nimetatakse ka stöhhiomeetriliseks seguks. Kütuse ja põlemisõhu vahekord sõltub kütuse keemilisest koostisest [50]. Biomasskütuses on näiteks süsiniku ja vesiniku osamaht väiksem kui bensiinis ning seetõttu vajab see ka põlemiseks vähem õhku (kütusesegu 6:1) [51]. Liiga rikka (vähe hapnikku) või lahja (palju hapnikku) kütusesegu mõjust on kirjutatud alajaotises 1.6.

Hapnikuanduri ehk lambdaanduri töötas välja Robert Bosch. Esimesena hakkas seda 1970-ndate aastate lõpus kasutama Volvo. Esimesed andurid olid 1- ja 2-juhtmelised. Need olid tehtud tsirkooniumist ja sõrmkübarakujulised. Töötemperatuuri saavutamiseks kasutasid need väljalasketorustikus liikuvat kuuma heitgaasi. Sellise lahenduse probleemiks oli asjaolu, et soojenemine võttis liiga kaua aega ja hapnikuandur ei olnud võimeline mootori juhtajule signaale edastama. Mõned autotootjad muutsid isegi mootori süüteajastust, et saada

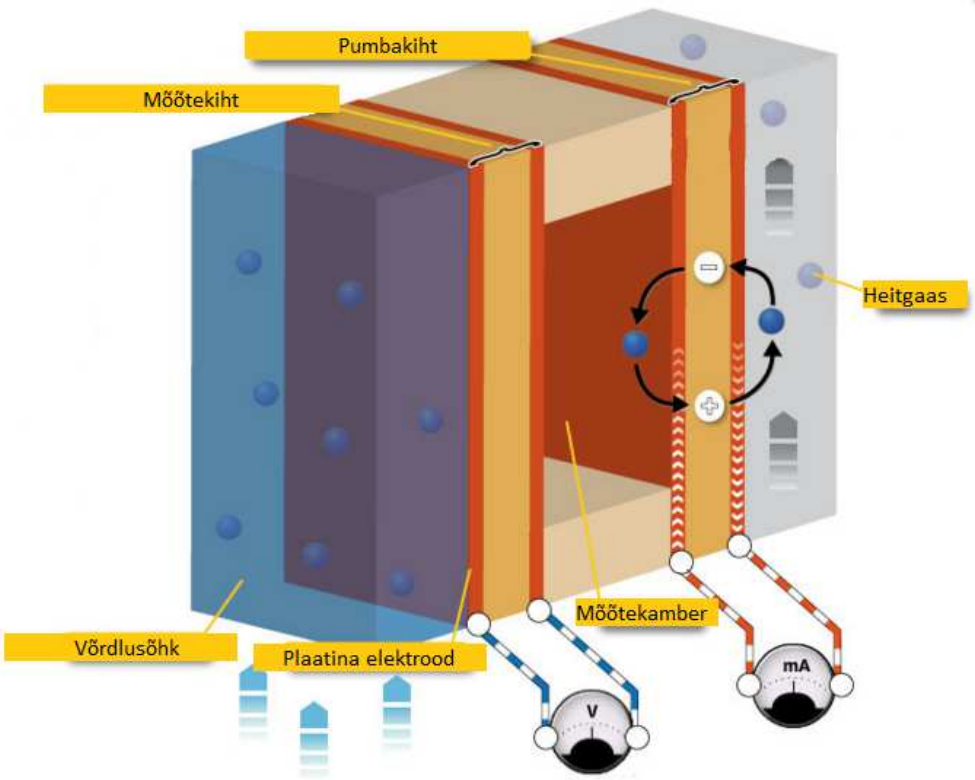
kõrgemaid väljalaske temperatuure ja soojendada hapnikuandurit kiiremini üles. Seetõttu püüti paigaldada andurid ka mootori silindritele küllaltki lähedale, kuid see polnud alati võimalik. Näiteks, kui väljalaske kollektorid asusid mootori eri külgedel. 1980-ndate aastate alguses lisasid anduritootjad sõrmkübara sisse küttekeha, mis võimaldas töötemperatuurini jõuda palju kiiremini. 1990-ndate aastate alguses kehtestati mitmeid piirnorme heitgaasidele [52]. Euroopa Liidus näiteks kehtestati 1992. aastal sõiduautodele Euro 1 saastenormi piirmäär, mida on aastatega järjest karmistatud ja tänapäevaks jõutud juba kuuenda normini [53]. See esitas uusi väljakutseid anduritootjatele – arendati välja uusi tehnoloogiaid ja hakati paigaldama mitmeid hapnikuandureid ühe sõiduki kohta. Senised kitsaribalised andurid asendati paljudel sõidukitel 4- ja 5-juhtmeliste lairiba anduritega. Tänaseks päevaks on kasutusel peamiselt kolme tüüpi hapnikuandureid: kitsaribaline tsirkoonium- ja titaandioksiidandur ning lairiba hapnikuandur [52]. Lisaks sõidukite heitgaasis sisalduva hapniku osamahu määramisele leiab hapnikuandur kasutust ka meditsiinis, tööstuses ja sukeldumisvarustuses [54].

Tsirkooniumdioksiidanduri elemendiks on ZrO_2 (tsirkooniumoksiid), mis on alates 300 °C hapniku ioone läbilaskev sõrmkübarakujuline keraamiline keha. Tsirkooniumdioksiidanduri tööpõhimõtet on kirjeldatud joonise 3.5 abil. Joonisel on näha sinisega õõnsa sõrme sees olev välis- ehk võrdlusõhk (hapniku kontsentratsioon u 20,8 %) ning punasega on madalama hapniku kontsentratsiooniga heitgaas. Kui andur on saavutanud oma töötemperatuuri, hakkavad ioonid liikuma tasakaalu saavutamiseks madalama hapniku kontsentratsiooniga anduri väliskülje poole. Selle tulemusel tekib pinge plaatinaelektroodil, mida põhjustab elektronide hulga potentsiaalne erinevus anduri kahel küljel. Umbes 2 % hapniku osamaht heitgaasis põhjustab 0,1 V anduri signaali. See näitab, et tegemist on lahja kütuseseguga. Rikkama kütusesegu korral on heitgaasis veelgi vähem hapnikku ning anduri signaal hüppab 0,9 V peale. Selline pinge kõikumine, amplituudiga 0,8 V, toimub sagedusega 1 – 2 Hz. Seega ei ole tsirkooniumdioksiidanduriga võimalik konkreetselt hinnata kui rikas või vaene on segu, vaid kütusesegu kõrvalekalde suunda stöhhiomeetrilisest segust. Antud anduri puhul on tegemist tänapäeval siiski ühe enimkasutatava anduriga [55].



Joonis 3.5. Tsirkooniumdioksiidanduri läbilõige [55]

Lairiba-lambdaanduri puhul on tegemist tsirkooniumdioksiidanduri edasiarendusega, mis tööpõhimõttelt on sarnane. Erinevus seisneb selles, et antud andur võimaldab mõõta kütusesegu stöhhiomeetrilise segu vahemiku väliselt. See tähendab, et lairiba anduri genereeritud väljundsignaal on proportsionaalne kütusesegu suhtes. Sellise anduri arendamise põhjuseks oli vajadus rikastada kütusesegu mootori külmkäivitusel ja suurtel koormustel. Samuti töötavad paljud kaasaegsed mootorid stöhhiomeetrilisest lahjema kütuseseguga. Mootori kütusesegu optimeerimine, vastavalt lairiba lambda poolt mõõdetud täpsele kütusesegule, aitab autotootjatel saavutada vastavust rangetele heitgaasi piirmääradele [55]. Lairibaanduri tööpõhimõtet saab kirjeldada joonise 3.6 abil. Joonisel on näha anduri elemendi kaks kihti: pumba- ja mõõtekiht. Mõõtekihi abil mõõdetakse ja võrreldakse mõõtekambris oleva heitgaasi osamahtu. Kui tegemist on stöhhiomeetrilise seguga, on mõõtekihi signaaliks 450 mV ning pumbakihi vooluks 0 A. Stöhhiomeetrilisest segust erineva kütusesegu korral püütakse viimane saavutada mõõtekambris pumbakihi vooluga, mis paneb hapniku ioonid liikuma. Kui mõõtekambris on lahja segu (liigselt hapnikku), on pumba vool positiivne, rikka segu (hapnikuvaene) puhul aga negatiivne.



Joonis 3.6. Lairiba-lambdaanduri elemendi läbilõige [56]

Pumbakihi voolu kasutatakse anduri signaalina, mis on proportsionaalne kütusesegu suhtes. Seega on võimalik väga täpselt määrata kütusesegu koostist erinevalt eelkäsitletud tsirkooniumdioksiidandurist. Lairiba-lambdaandureid on hakatud üha rohkem kasutama bensiinil töötavates autodes ning viimastel aastatel ka diiselmootoriga varustatud sõidukites [56].

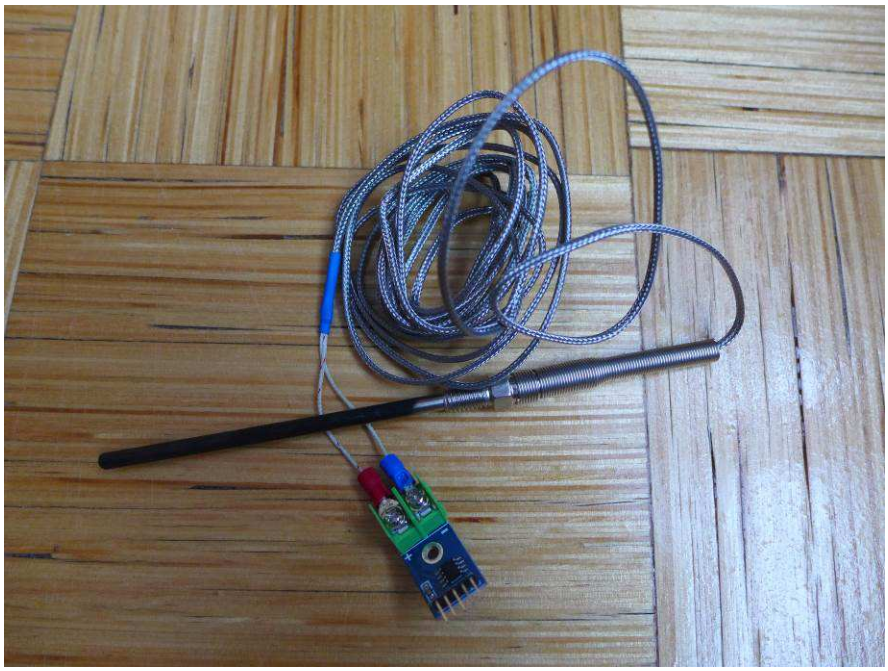
Titaandioksiidandur on sarnaselt tsirkooniumdioksiidandurile kitsaribaline. Erinevus seisneb tööpõhimõttes, nimelt on anduri element valmistatud titaandioksiidmaterjalist ja on heitgaasi hapnikusisalduse suhtes muutuva elektritakistusega. Titaandioksiidi juhtivus väheneb stöhhiomeetrilisest lahjema segu korral ja suureneb, kui heitgaasis on ideaalist vähem hapnikku (rikas segu). Töötemperatuur on titaandioksiidanduril üpriski kõrge ja jääb umbes 700 °C kanti. Kirjeldatud anduri eelis on see, et ta on mõõtmetelt väiksem ning ei vaja võrdluseks välisõhku. Sellele vaatamata kasutatakse titaandioksiidandurit vähe [56].

Alajaotist kokkuvõttes, on mitmeid tööpõhimõttelt erinevaid hapnikuandureid. Biomassi põlemisel tekkivas suitsugaasis hapniku osamahu mõõtmiseks sobib kõige enam laiaribaline hapnikuandur, mida on kasutatud ka käesolevas töös. Kitsaribaliste andurite mõõteala on

lihtsalt liiga kitsas, sest on autotööstuses mõeldud kütusesegu hoidma stöhhiomeetrilisena (λ = 1). On muidugi ka erandeid, Boschil on näiteks tootevalikus ka nn „lahja segu“ hapniku andur LSM 11. Tegemist on tsirkooniumdioksiidanduriga, mille mõõteulatust on laiendatud lahja segu piirkonnas (λ = 1,0…2,0). Seda andurit autotööstuses üldiselt ei kasutata, see on mõeldud mõõtma hapniku kontsentratsiooni eelkõige õli, gaasi, biomassi, kivisüsi ja prügi põletavate seadmete suitsugaasis [57]. Seega saaks LSM 11 hapnikuandurit kasutada ka ahjude puhul, eeldades, et liigõhutegur on < 2. Viimastel aastatel on siiski hakatud ka LSM 11 asemel kasutama laiaribalisi hapnikuandureid, mis on täpsemad ja suurema mõõteulatusega. Asendamaks LSM 11-st Boschi LSU seeriaga (lairiba-lambdad), toodetakse isegi vastavaid adaptereid [58].

3.5. Termopaar – suitsugaasi temperatuuri mõõtmine

Kuigi antud töö käigus ehitatud põlemisautomaatika temperatuuril ei baseeru, jälgiti katsete sooritamisel suitsugaasi temperatuuri koldes või vahetult enne korstnasse sisenemist. Kuna antud temperatuurid erinevad üksteisest oluliselt (isegi kuni 1000 °C), on mõõtmiseks kasutatud laia mõõteulatusega termopaari (joonis 3.7).

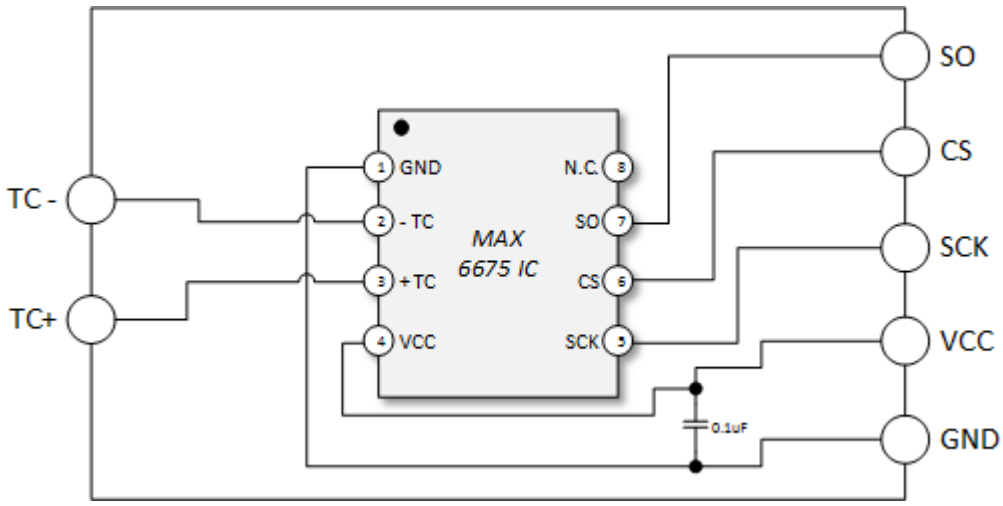


Joonis 3.7. Termopaar koos võimendiga MAX6675

Tegemist on K-tüüpi termopaariga, mille mõõteulatus on -100…1250 °C ja mõõtekaabli pikkuseks 3 meetrit. Antud termopaari mõõtepea pikkuseks on valitud 150 mm, mis võimaldab seda augu puurimise näol kergesti paigaldada ka paksema välisvoodriga kütteseadmesse. Kõikide termopaaride töö põhineb *Seebecki* efektil, mis seisneb selles, et kahe erineva temperatuuriga keha vahel tekib elektromotoorjõud. Seega kasutatakse termopaaride valmistamisel erinevaid metalle, sõltuvalt soovitud tulemusest. Kuna tekkiv elektromotoorjõud on küllaltki väike (K-tüüpi termopaaril näiteks temperatuuril 1300 °C ainult umbes 55 mV) ja muutub iga kraadi kohta vähe, on kasutatud termopaari võimendit MAX6675 (joonis 3.7) [59, 60]. Võimendi tehnilised näitajad on järgmised:

- toitepinge: 3,3…5 VDC;
- töövool: ~ 50 mA;
- mõõteulatus: 0…1024 °C;
- mõõtetäpsus: +/- 0,25 °C;
- väljund: SPI andmeside protokoll;
- kasutatav andur: K-tüüpi termopaar.

Nagu näha, võimaldab võimendi edastada temperatuure vahemikus 0…1024 °C, kuigi kasutatud K-tüüpi termopaari temperatuuridiapasioon on laiem, mis tuleneb sellest, et MAX6675-le on sisseehitatud 12-bitine ADC. Pinge konverteeritakse kahendsüsteemi 2^{12} = 4 096, mille jagades 4-ga (arvestades anduri mõõtetäpsust 0,25 °C), on tulemuseks 1024 näitu. Termopaari, MAX6675 ja Raspberry Pi omavaheliseks ühendamiseks on kasutatud joonisel 3.8 esitatud skeemi.



Joonis 3.8. Termopaari, MAX6675 ja juhtseadme ühendamise skeem [60]

Tähtis on, et termopaari poolused (TC- ja TC+) oleks võimendiga õigesti ühendatud, vastasel juhul saame temperatuuri tõustes hoopis langevaid näite. Võimendi ja juhtseadme vahelise andmeside toimimiseks peavad olema ühendatud SPI liidese viigud SO (jada väljund), CS (alluva saatmise sisse lülitamine) ja SCK (jadasignaali takt) [60].

3.6. Õhuklapp ja samm-mootor

Koldesse siseneva põlemisõhu reguleerimiseks on kasutatud samm-mootoriga liigutatavat ventilatsiooni õhuklappi. Kuna nimetatud klapp koos mootoriga on põlemisautomaatsüsteemide üheks kallimaks komponendiks, on see valmistatud autori poolt, kasutades käsitsi opereeritavat ventilatsiooniklappi ja selle liigutamiseks soetatud samm-mootorit. Õhuklapi valimisel tuleb jälgida peamiselt kahte parameetrit. Esiteks õhuklapi diameetrit, millest sõltub seda läbiva põlemisõhu kogus, ja teiseks, et klapp oleks 100 % õhutihe sulgemisel (varustatud tihendiga). Poola firma Tatarek pakub oma tootevalikus näiteks kolme erineva diameetriga õhuklappi: 100, 120 ja 150 mm. Sobiva diameetriga õhuklapi valimisel soovitatakse järgida kütteseadme tootjapoolset nõuannet [39]. Üldiselt tuleks ahjude puhul valida suurema diameetriga õhuklapp, sest korraga põletatakse koldes rohkem puid ja seega on ka põlemisõhu hetkeline vajadus suurem. Pliitide puhul on võimalik hakkama saada ka väiksemate klappidega, kuid tuleks eelistada suuremaid, sest õhuvoolu piirata saab alati, kuid seda juurde tekitada pole võimalik. Sobiva diameetri õhuklapile saab leida ka programmiga *Kachelofen Basic*. Tegemist on Austriast pärit programmiga, mis põhineb juba varasemalt mainitud standardile EN 15544, kus on öeldud, et külgmise põlemisõhu varustuse sissevoolu kiiruseks peaks olema 2…4 m/s. Programm soovitab 10 kg kütusele mõeldud kolde õhuklapi diameetriks 150 mm.

Antud töös on siiski kasutatud 120 mm läbimõõduga ventilatsiooniklappi, mis saadi kasutatud kujul. Positiivseks küljeks antud klapi puhul on see, et see omab tihendit ja võimaldab seeläbi sulgeda põlemisõhu läbivoolu 100 %. Liblikklapi pööramiseks on paigaldatud selle pöörlemisteljele samm-mootor, mis on ühendatud klapiga poltliite abil. Mootori fikseerimiseks samale teljele on klapi kerele keevitatud sobiv kinnituskronstein. Silindrilisele klapi kerele on otsa keevitatud ka flants, mis võimaldab seda kinnitada Eesti Maaülikooli pliidi tuharuumi avale (joonis 3.9). Kui on varasemalt teada, et tahetakse

paigaldada põlemisõhku reguleeriv klapp, saab sellega arvestada kütteseadme ehitamise käigus, mistõttu on paigaldus lihtsam ja välimuselt ilusam, sest nähtavale jääb ainult rest, mille kaudu põlemisõhk koldesse imetakse.

Joonis 3.9. Põlemisautomaatika paigaldatuna pliidi tuharuumi avale

Töös on kasutatud liblikklapi liigutamiseks samm-mootorit. Võimalus oleks olnud kasutada ka servomootorit. Kuna peamisteks valikukriteeriumiteks olid madal hind ja sealhulgas piisav pöördemoment, mis jõuaks liigutada tihendiga liblikklappi, siis otsustatigi samm-mootori kasuks. Nimelt madalamal pöörlemiskiirusel on samm-mootoril võrreldes sarnase servomootoriga suur pöördemomendi eelis. Seda enam, et klapi liigutamise kiirus pole antud juhul oluline [61]. Pöördemomendi valikul on lähtutud ventilatsioonitorustikele täitureid müüvate firmade (*Siemens* ja *Belimo*) kataloogidest, kus 2 Nm ajam võimaldab väidetavalt liigutada umbes 0,3 m^2 suurust õhuklappi [62, 63]. Antud töös kasutatud klapp on küll pindalalt kordades väiksem, kuid omab tihendit, mis tingib suurema vastupanumomendi liblikklapi liigutamisel. Toetudes nimetatud asjaoludele valiti klapi liigutamiseks samm-mootor SC42STH38-1304AF Hiina tootjalt *SunCor Motor* (joonis 3.10).

Joonis 3.10. Samm-mootor SC42STH38-1304AF

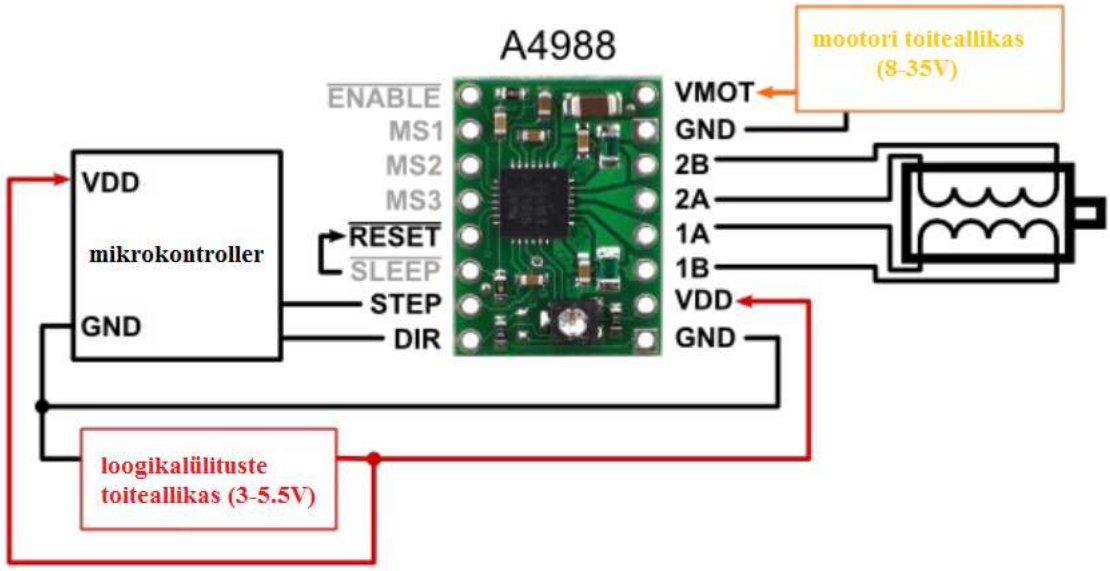
Mootori tööparameetrid on:

- sammunurk 1,8°;
- maksimaalne pöördemoment 0,4 Nm;
- hoidemoment 0,26 Nm;
- takistusmoment 0,015 Nm;
- faasivool 1,3 A;
- faasitakistus 2,5 Ω [64].

Tegemist on alalisvoolu sünkroonmootoriga, mille rootor pöörab ennast vastavalt juhtseadmest (Raspberry Pi 2) saadud pingeimpulssidele. Erinevalt asünkroonmootoritest, on nende iseärasuseks pingeimpulssidega käitamine ning astmeline pöördliikumine. Selle mootoritüübi puuduseks on väike võimsus. Üldiselt kasutatakse samm-mootorit vaid suhteliselt väikestel koormustel. Suureks eeliseks on aga see, et samm-mootor ei vaja keerulist rootoriasendi andurit, kuna asendi määravad juhtseadmelt saadud impulsside arv ja suund. Bipolaarsel mootoril on kaks mähist kokku 4 ühendusklemmiga. Mootori pöörlema panemiseks tuleb mähised pingestada. Mähise otste pingestamisteks väljastab mikrokontroller 4–kohalise bitijada. Iga uue bitijadaga pöördub rootor ühe sammu võrra. Pidev pöörlemine saavutatakse tarkvaraliselt programmitsükliga, kus antakse ette sammude arv. Sammu pikkus sõltub mootorist. Kasutataval samm-mootoril on sammunurgaks 1,8°. Liblikklapi pööramiseks täies ulatuses (90°) on vaja teha seega 50 sammu. Samm-mootorite olulisteks põhinäitajateks on ka hoide- ja takistusmoment. Hoidemoment on suurim moment, millega saab koormata pingestatud samm-mootori võlli, ilma, et tema asend muutuks.

Takistusmoment on aga suurim moment, millega saab koormata pingestamata samm-mootori võlli, ilma et tema asend muutuks [65].

Kuna tegemist on bipolaarse samm-mootoriga, on selle juhtimiseks kasutatud A4988 ajurit. Selle eesmärgiks on toita samm-mootorit, sest juhtseade selliseid voole ei võimalda. Nimetatud ajur on võimeline varustama mootorit kuni 2 A vooluga ühe mähise kohta. Selle ajuri ühendamiseks juhtseadme, eraldiseisva toiteallika ja samm-mootoriga, on kasutatud joonisel 3.11 esitatud skeemi.



Joonis 3.11. Ajuri A4988 ühendamise skeem juhtseadme ja samm-mootoriga [66]

Mootori ajuril on lisaks eraldatud toitele ka teisi samm-mootori juhtimiseks vajalikke positiivseid omadusi:

- võimaldab mootorit juhtida 5 erinevas sammu resolutsioonis: täissamm, poolsamm, veerandsamm, kaheksandiksamm, kuueteistkümnendiksamm;
- voolu piiramine potentsiomeetriga, et saaks kasutada samm-mootori nimipingest kõrgemaid pingeid;
- omab üle- ja alapingekaitset;
- lühise- ja liigkoormuskaitse olemasolu [64].

Käesolevas töös juhiti mootorit täissammuga (1,8°), sest täpsemaks liblikklapi pööramiseks vajadus puudus. Küll aga kasutati A4988 ajuril olevat potentsiomeetrit, et ei ületataks lubatud nimivoolu (1,3 A). Nimelt kasutati samm-mootori toiteks 12 V pingega toiteallikat,

kuid mootori nimipinge oli vastavalt nimiandmetes antud voolule ja takistusele tuginedes ainult 3,25 V.

Alajaotist kokku võttes võib nentida, et kasutatud õhuklapp ja selle opereerimiseks valitud samm-mootor täitsid projektis oma eesmärgi. Soovides universaalsemat ja töökindlamat põlemisautomaatikat, tuleks kasutada suurema diameetriga õhuklappi ja mõnevõrra suurema pöördemomendiga samm-mootorit.

3.7. Tarkvaralahendus

Olles valinud põlemisautomaatika ehitamiseks vajaliku riistvara, tuli hakata mõtlema tarkvaralisele poolele ehk kirjutada kood, mis juhiks antud süsteemi. Programmikood on kirjutatud *Python* keeles. *Python* programmeerimiskeskkond tuleb kaasa, kui installeerida Raspberry Pi-le operatsioonisüsteem *Raspbian*, kasutades *NOOBS* paketti. Koodi kirjutamiseks valiti antud projekti puhul *Python*, sest tegemist on võimsa, kuid lihtsa vabavaralise programmeerimiskeelega. *Python* leiab ka üha enam kasutust programmeerimise algkursustes koolides ja ülikoolides ning tänu selle kiirele arengule on saadaval palju õpikuid paberkandjal ja hulgaliselt veebimaterjale [67].

Kuna töö autoril varasem kokkupuude *Python* keelega puudus, otsustati lihtsuse mõttes programmikoodi kirjutamisele läheneda osade ehk moodulitena. Seega jagati kood neljaks mooduliks:

- hapnikuanduri moodul;
- samm-mootori juhtimise moodul;
- termopaari moodul;
- PID-regulaatori moodul.

Kui kõigi nimetatud nelja mooduli kood oli kirjutatud ja nende toimivust kontrollitud, moodustati nö põhikood, kuhu imporditi varasemalt koostatud moodulid. Põhikood ja nimetatud neljas moodulis sisalduv kood on esitatud töö lisades 1 – 5. Moodulite koostamisel on kasutatud ka teiste autorite poolt loodud tarkvara. Sellist koodi taaskasutamise vajadust mõisteti juba 1980-ndatel aastatel, sest uue tarkvara arendamine nö nullist oli ja on tänapäevani väga ajamahukas tegevus [68]. Siiski on moodulites kasutatud koodi vastavalt

antud projekti vajadustele vähemal ja suuremal määral muudetud. Samuti ei ole võimalik kõigile probleemidele leida lahendust teiste autorite loodud koodi näol. Nii on näiteks samm-mootori moodulis olev kood kirjutatud suures osas iseseisvalt, tuginedes käesoleva projekti vajadustele. Nimelt ei suutnud autor veebist leida samm-mootori juhtimiseks vajalikku koodi, mis töötaks vastavalt PID-regulaatori moodulis arvutatud õhuklapi asendi väärtusele. Antud projekti raames koostatud samm-mootori juhtimise koodi erinevus võrreldes teiste veebist leitavate koodi näidetega on see, et samm-mootori pööramisel arvestatakse selle eelnevat pöördenurka (õhuklapi pööramine toimub alati vahemikus 100 % suletud või avatud). Moodulites kasutatud koodi tuli suuresti muuta ka selleks, et oleks tagatud nende koostoimivus põhikoodis. Sellele vaatamata oli veebist leitud koodi näidetest palju kasu *Python* programmeerimiskeelega tutvumisel, millega hoiti kokku antud projektile programmkoodi kirjutamiseks kuluvat aega.

3.8. Seadeväärtused põlemisautomaatika koodis

Põlemisautomaatika toimimise seisukohalt on kirjutatud koodis olulised mitmed seadeväärtused. Neist tähtsaim on loomulikult liigõhutegur, mille tagasisidel ehitatud põlemisautomaatika põhineb. Liigõhutegurit ja selle optimaalset väärtust on täpsemalt kajastatud alajaotises 1.6. Erinev liigõhutegur tuli koodi sisestada kahel korral, kui põlemisautomaatikat katsetati vastavalt pliidi ning ahjuga. Lisaks liigõhutegurile on koodis ka teisi seadeväärtusi, kuid nende muutmine vastavalt küttekoldele, kasutatud kütusele jne ei ole vajalik. Üheks selliseks seadeväärtuseks on näiteks aeg, mille järel samm-mootori mähistele pingeimpulsse antakse. See määrab ära samm-mootori ja sellest tulenevalt ka õhuklapi pööramise kiiruse. Sobiv seadeväärtus leiti katsetamise teel, lähtudes sellest, et kiiremal pööramisel väheneb pöördemoment ning on oht samme vahele jätta.

Olulisteks seadeväärtusteks koodis on ka PID-regulaatori mooduliga seotud väärtused. Nimelt kasutades PID-reguleerimist, tuleb see häälestada kasutades võimendustegureid (Kp, Ki, Kd). Nende tegurite häälestamiseks on kaks põhimeetodit:

1) tegurid leitakse kasutades erinevaid arvutusmeetodeid ja juhitava protsessi matemaatilist mudelit;
2) tegurid määratakse katse-eksitus meetodil [69].

Antud juhul on tegurite leidmiseks kasutatud katse-eksituse meetodit, sest põlemisprotsessile matemaatilise mudeli koostamine oleks olnud küllaltki keerukas. Katsetamise käigus otsustati PI-regulaatori kasuks (jäeti ära Kd-diferentseeriva toime võimendustegur). Seega leiti protsessile sobivad proportsionaalse (Kp) ja integreeriva (Ki) toime võimendustegurid. Proportsionaalsel komponendil on juhtimissüsteemile otsene mõju ehk mida suurem on juhtimisviga, seda suuremat mõju see regulaatori toimele avaldab. Proportsionaalse teguri valikul lähtuti sellest, et liiga suur Kp põhjustab protsessisuuruse võnkumist ümber seadeväärtuse ja väike Kp toob kaasa selle, et muutustele protsessis ei reageerita piisavalt kiiresti. Staatilise vea vähendamiseks kasutatakse integraalset komponenti. Antud juhul tähendab see seda, et kui liigõhutegurit ei suudeta piisavalt kiiresti viia soovitud väärtusele, siis integraalne osa aitab protsessi kiirendada, sest juhttoime arvutatakse proportsionaalselt ajas summeeritud vea järgi. Et vea summeerimisest tulenevalt ei tekiks regulaatori toime äärmustesse kasvamist, on koodis täiendavate seadeväärtuste abil piiratud integraalse komponendi muutuja suurust. Nagu eelnevalt juba käsitletud, diferentseerivat komponenti antud projekti regulaatori toimet arvutavas tsüklis ei kasutatud. Siiski tasub mainida, et antud komponendi ülesanne on arvestada vea muutumise tõusuga igas arvutustsüklis ja vastavalt sellele ennustada vea muutumist. Diferentseerivat komponenti kasutatakse juhul, kui häälestatud PI-regulaatori korral jääb protsessisuurus võnkuma ümber seadeväärtuse [70]. Põlemisautomaatika puhul seda ei täheldatud, sest regulaatori toime mõju protsessile on vahetu. Piltlikult selgitades, muutes õhuklapi asendit, muutub väga kiiresti ka hapnikuanduriga mõõdetav tagasisidena kasutatav liigõhuteguri väärtus. Vastupidise näitena võib tuua välja toatemperatuuri, mis reageerib näiteks radiaatori võimsuse muutmisele oluliselt aeglasemalt. Lisaks käsitletud regulaatori võimendusteguritele on PID moodulis tähtsal kohal ka seadeväärtus, mis määrab aja, mille järel toimub iga järgneva tsükli arvutamine ja seega ka vastavalt tulemusele õhuklapi pööramine.

Kokkuvõtvalt on kirjutatud koodis palju muudetavaid seadeväärtusi, millest sõltub otseselt põlemisprotsessi reguleerimise kvaliteet.

4. EHITATUD PÕLEMISAUTOMAATIKA KATSETAMINE

4.1. Läbiviidud katsetest üldiselt

Kontrollimaks, kas ja kuidas käesolevas magistritöös projekteeritud ja ehitatud põlemisautomaatika toimib, on tehtud proovikütmisi kahel puitkütusel töötaval kütteseadmel (pliit ja ahi). Ka eelnevas peajaotises käsitletud programmikoodi mitmed seadeväärtused on häälestatud esimeste kütmiste käigus. Hindamaks põlemisautomaatika toimivust, on sooritatud kummagi kütteseadmega lisaks vähemalt kaks proovikütmist samadel tingimustel ilma põlemisautomaatikata ja koos sellega. Nende kütmiste tulemused on kommenteeritud järgnevates alajaotistes ja esitatud ka graafilisel kujul. Katseandmed on kogutud heitgaasianalüstaatoriga Testo 350, mis mõõtis mitmeid mürgiseid komponente suitsugaasis, hapniku osamahtu ja temperatuure. Antud peajaotises esitatud graafikutel on mahu kokkuhoiu mõttes esitatud käesoleva töö seisukohalt tähtsamad: liigõhutegur, kasutegur ja vingugaasi sisaldus.

4.2. Katsed pilukolde pliidiga

Esmalt seadistati ja katsetati ehitatud põlemisautomaatikat Eesti Maaülikooli tehnikamaja katlalaboris asuva pilukolde pliidiga (joonis 4.1). Esimestel proovikütmistel seadistati peamiselt põlemisautomaatikat ja parandati muid ilmnenud vigu. Samuti püüti leida antud pliidile sobivat liigõhutegurit. Kuigi tegemist on pilukolde pliidiga ning põlemisõhu segunemine suitsugaasidega peaks olema hea, siis madalamat liigõhutegurit kui 2,5 alguses kasutada ei saanud, sest tekkis õhupuudus, mis viis isegi tule kustumiseni. Probleemi lähemalt uurides selgus, et lisaks õhuklappi läbivale põlemisõhule imeti õhku kütteseadmesse ka mujalt pliidi kestas olevatest piludest ja pragudest. Selline lisaõhk suitsugaasis põhjustas selle, et lambdaandur mõõtis hapnikku, mis kollet ei läbinud ega osalenud põlemises. Seega lambdaanduri tagasisidele põhinedes piiras põlemisautomaatika õhuklappi pöörates põlemisõhku rohkem kui reaalselt vaja oleks olnud.

Joonis 4.1. Põlemisautomaatika katsetamine EMÜ katlalabori pilukoldega pliidil

Peale tihendustöid õnnestus siiski põlemisprotsessi juhtida ka mõnevõrra madalamal liigõhuteguri väärtusel (λ = 2,1). Esile kerkinud probleemist tuleneb ka üks hapnikuanduri tagasisidel põhineva põlemisautomaatika puudus. Nimelt on selle toimivuse seisukohalt ülimalt oluline, et kütteseadmesse ei satuks lisaõhku mujalt kui selleks ettenähtud kanalist. Probleem on seotud eelkõige käsitööna ehitatud pliitide ja ahjudega, tehases valmistatud kütteseadmetel ei peaks seda üldiselt ilmnema.

Olles leidnud sobivad seadeväärtused, viidi läbi võrdluskütmine põlemisautomaatikaga ja ilma selleta. Mõlemal katsel kasutati ka suitsugaasianalüsaatorit, et hinnata põlemise kvaliteedi erinevust. Saadud mõõtmistulemused on esitatud joonisel 4.2.

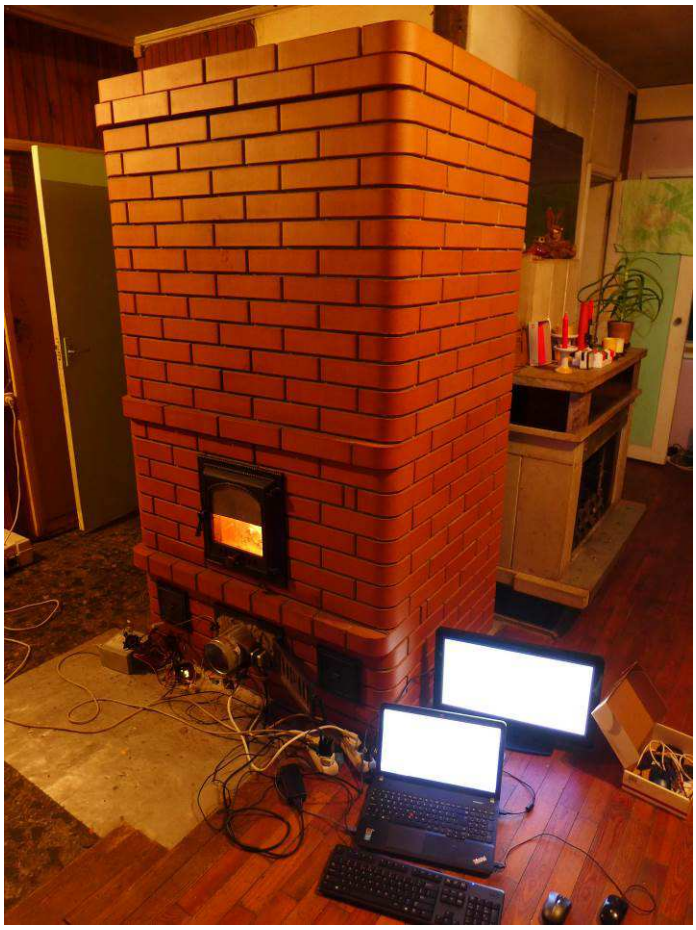
Joonis 4.2. Pliidi kütmise tulemused põlemisautomaatikaga ja ilma

Kütmised viidi läbi võimalikult sarnastel tingimustel. Selleks kasutati võimalikult sarnase läbimõõdu ja niiskussisaldusega puuhalge, mis kaaluti enne koldes põletamist. Samuti ei jäetud ilma põlemisautomaatikata kütmisel põlemisõhu kanalit täiesti avatuks, vaid seati see optimaalseks, et mitte saavutada tahtlikult paremaid tulemusi. Puude süütamisest tulenev erinevus püüti elimineerida sellega, et halud asetati juba eelnevalt ülesköetud pliidi koldes olevatele sütele. Halud lisati samal kolde temperatuuril, mida jälgiti termopaariga. Nagu jooniselt 4.2 näha, on põlemise kvaliteet alguses küllaltki võrdne, kuid erineb lõppfaasis. Nimelt piirab automaatika põlemisõhu kogust, mis toob kaasa pikema põlemisprotsessi, madalama vingugaasisisalduse ja kõrgema kasuteguri. Põlemisautomaatikat kasutades vähenes vingugaasi kontsentratsioon 2366 mg/MJ-lt 1109 mg/MJ-ni ja suurenes kaudne kasutegur põlemisprotsessi keskmisena 55 %-lt 68 %-ni. Liigõhuteguri graafikult on näha, et see ei ole kogu põlemisprotsessi ulatuses reguleeritud juba eelnevalt mainitud väärtusele 2,1, sest põlemise lõppfaasis on põlemisõhu ja suitsugaaside segunemine halvem ja seega on automaatika seadistatud nii, et õhuklappi ei suleta täielikult. Üldiselt on pliidi puhul hapnikuanduri tagasisidel töötava automaatika kasutamine problemaatiline, sest koldes põletatakse korraga vähe puid ja protsess on lühike. See aga võimaldab reguleerimist kindlal etteantud liigõhuteguri väärtusel lühikest aega, millest tulenevalt oleks heaks lahenduseks alustada ja lõpetada hapnikuanduri tagasisidel põhinevat reguleerimist vastavalt kolde temperatuurile. Ehk alustada reguleerimist, kui temperatuur koldes on jõudnud mingi etteantud väärtuseni ja lõpetada, kui see on langenud allapoole seadistatud suurust. Selline lahendus on tõenäoliselt heaks ja lihtsaks edasiarenduseks ehitatud põlemisautomaatikale, sest temperatuuri mõõtmist käesolevas töös kasutatud riist- ja tarkvara juba võimaldab. Juurde tuleks kirjutada ainult programmikoodi.

4.3. Katsed restkolde tellisahjuga

Kuna põlemisautomaatika katsetamine pliidiga ei võimaldanud täielikult määrata põlemisautomaatika kasulikkust, on seda tehtud ka ahjuga. Tegemist on restkoldega tellisahjuga (joonis 4.3), ligikaudse massiga 2,5 tonni. Ahju kolde suurus võimaldab sinna korraga laadida umbes 10 kg halupuid. Seda kogust kasutati ka võrdluskütmisel, kusjuures katsed sooritati eri päevadel. Kuna tuli tehti erinevalt pliidiga katsetamistest mõlemal korral jahtunud koldesse, pöörati tähelepanu ka sellele, et süütamine oleks sarnane. Mõlemal

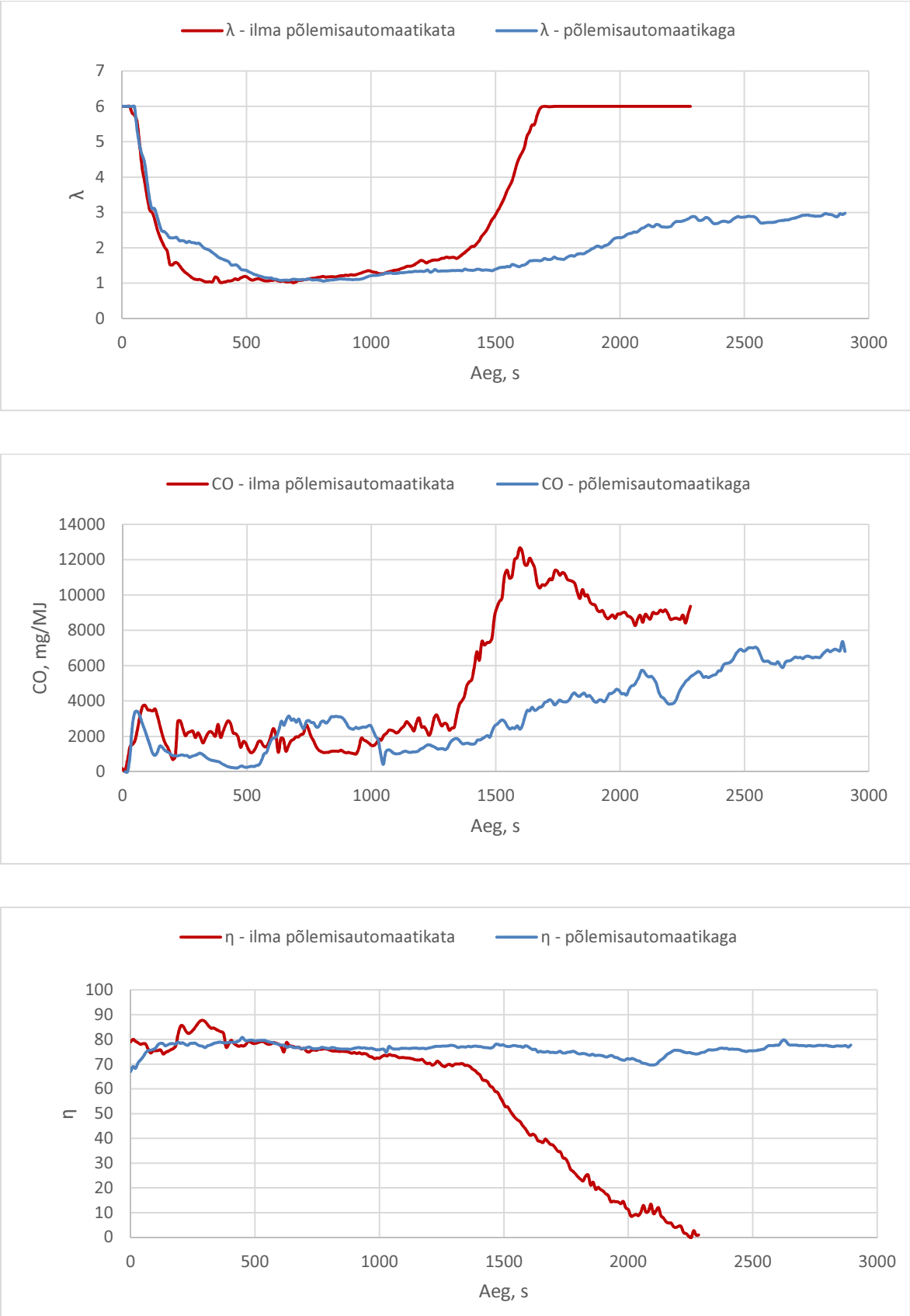
päeval kasutati pealtsüütamist ja samasugust süütematerjali. Kuna halupuude kogus ahju puhul oli oluliselt suurem, saavutati ka pikem põlemisprotsess, mis võimaldas paremini jälgida põlemisautomaatika käitumist.



Joonis 4.3. Põlemisautomaatika katsetamine restkoldega tellisahjul

Pliidiga võrreldes sai lisaks pikemale põlemisprotsessile ahju puhul kasutada ka põlemisõhu reguleerimisel oluliselt madalamat liigõhutegurit (λ = 1,3).

Sarnaselt pliidi katsetele on ka ahju puhul läbi viidud suitsugaasi mõõtmine ja tulemused esitatud joonisel 4.4. Joonise liigõhuteguri katseandmetest on näha, et nii põlemisautomaatikaga kui ilma selleta langes see põlemise enim õhku nõudvas faasis isegi väärtuseni üks. Kusjuures ilma automaatikata kütmisel olid põlemisõhku reguleerivad siibrid maksimaalselt avatud. Rohkem õhku oleks koldesse saanud lasta ainult tuharuumi ust avades.



Joonis 4.4. Ahju kütmise tulemused põlemisautomaatikaga ja ilma

Põlemisautomaatikaga katses oli samuti õhuklapp 100 % avatud, millest võib järeldada, et viimase läbimõõt on ahjule liiga väike. Probleemi on käsitletud juba ka antud töö varasemas alajaotises 3.6. Sellele vaatamata suutis põlemisautomaatika hoida ajavahemikus 1000 – 1500 s liigõhutegurit seadistatud väärtusel 1,3. Seega oleks suurema õhuklapi läbimõõdu ja kolde temperatuuri abil määratud reguleerimise kestvus vähemalt pool kogu põlemisprotsessist (süütamisest kuni põlemisõhu täieliku sulgemiseni). Antud juhul oleks see umbes 25 minutit, mis esmapilgul ei tundu küll pikk aeg, kuid on oluline, sest selle aja jooksul peab võimalikult palju halupuudes sisalduvast energiast salvestuma ahju, mitte väljuma korstna kaudu. Siit ka tõsiasi, miks ahjude puhul võib autori arvates põlemisautomaatika olemasolu pidada isegi tähtsamaks kui näiteks pelletikateldel, kus akumulatsioonipaagis olevat soojuskandjat soojendatakse mitmeid tunde ning lühiajaline ebaefektiivne põlemine ei mõjuta oluliselt toatemperatuuri. Ahju puhul võime aga kaotada väga suure hulga soojusenergiat, kui põlemise lõppfaasis kasvõi 10 minutit opereeritakse kõrgetel liigõhuteguri väärtustel ehk lastakse liigsel põlemisõhul kanda soojust korstna kaudu välja. Ahjukatse puhul oli ka põlemisprotsess põlemisautomaatikat kasutades vähemalt 20 minutit pikem. See on salvestavate kütteseadmete puhul oluline, sest lisaks kõrgele temperatuurile koldes peab olema soojusel ka aega salvestuda ahju materjali. Suitsugaasianalüsaatoriga üles võetud põlemisprotsessi keskmine kaudne kasutegur oli ilma automaatikata 62 % ja koos sellega 76 %. Lisaks paranenud kasutegurile vähenes põlemisautomaatikat kasutades vingugaasi sisaldus, olles keskmisena 3000 mg/MJ põlemisprotsessi kohta taandatuna 13 % hapniku osamahule, kui ilma automaatikata oli see 4520 mg/MJ. Seega on põlemisautomaatikat kasutades võimalik oluliselt vähendada ka mürgiste suitsugaasi komponentide osamahtu. Edasistes uuringutes oleks huvitav katsetada põlemisautomaatikat ka ahjudel, mis omavad külgmiste põlemisõhukanalitega täiustatud kollet. Nimelt on Soomes samatüüpi 2,7 tonnise tellisahju katsetamisel saadud ühekordsel puude lisamisel vingugaasi sisalduseks 5260 mg/MJ ning koos põlemisõhu juhtimisega koldesse külgedelt koguni 490 mg/MJ [71]. Võib arvata, et põlemisautomaatikaga on võimalik vingugaasi sisaldust veelgi vähendada.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö teemaks on „Ahjus toimuva põlemisprotsessi juhtimise automaatika“. Selle käigus on ehitatud seade, mis aitab põlemist efektiivsemaks ja puhtamaks muuta, boonusena mugavus, reguleerides automaatselt põlemisprotsessi. Selleks, et saada üldisi ning täiendavaid teadmisi ahiküttest ja tänapäeval kasutatavatest lahendustest, on töö autor läbinud 40 tunnise „Energiasäästlike ja keskkonnasõbralike kütteseadmete ehituse“ koolituse. Lisaks sellele on tutvutud ka turul olevate seadmetega ning uuritud ühte neist lähemalt. Selleks on Poola firma Tatarek poolt toodetud põlemisautomaatika, mida turustavad ja paigaldavad ka mitmed müüritud küttekollete ehitajad Eestis. Lisaks tootjapoolse manuaali uurimisele on sooritatud ka suitsugaasi analüüs ühele antud seadmega varustatud pilukoldega ahjule. Selgus, et sellise kolde temperatuuri tagasisidel põhineva automaatika miinuseks on korduv seadistamise vajadus, mille tulemus võib kokkuvõttes jääda kesiseks, sest seadistus ei tule toime tõmbe või kütusekoguse muutusest põhjustatud teistsuguse põlemisõhu vajadusega, mille tagajärjel langeb põlemisprotsessi kvaliteet.

Olles kogunud piisavalt informatsiooni, tekkis idee ehitada põlemisautomaatika, mis põhineks hapnikuanduri tagasisidel, muutes seadme eriliseks, sest turul olevad ahjudele mõeldud seadmed on enamjaolt temperatuuri tagasisidel toimivad. Kuna töö autoril oli kasutada autotööstuses kasutatav hapnikuandur, on uuritud selle sobivust ahju suitsugaasis sisalduva hapniku osamahu määramisel. Selleks on sooritatud võrdlusmõõtmine heitgaasianalüsaatori Testo 350-ga, küttes Eesti Maaülikooli katlalaboris asuvat pliiti. Saades positiivseid tulemusi biomassi põletava kütteseadme suitsugaasis sisalduva hapniku osamahu mõõtmisel sõidukitele ettenähtud hapnikuanduriga, on järgnevalt tegeletud muude põlemisautomaatika ehitamiseks vajaminevate riistvaraliste komponentide valimisega:

- juhtseade, milleks kasutati miniarvutit Raspberry Pi 2;
- õhuklapp põlemisõhu reguleerimiseks;
- samm-mootor ja selle draiver õhuklapi pööramiseks;
- termopaar koos võimendiga suitsugaasi temperatuuri mõõtmiseks.

Peale põlemisautomaatika ehitamiseks vajaliku riistvara valimist on süsteemi juhtimiseks koostatud kood programmeerimiskeeles *Python*. Lihtsuse huvides on see jagatud neljaks mooduliks:

- hapnikuanduri moodul;
- samm-mootori juhtimise moodul;
- termopaari moodul;
- PID – regulaatori moodul.

Nimetatud moodulid toimivad ka eraldiseisvalt, kuid antud projekti raames töötavad need üksteisest sõltuvalt ja on imporditud neid kokkuvõtvasse põhikoodi.

Projekteeritud ja ehitatud põlemisautomaatika seadistamiseks ja toimivuse kontrollimiseks on tehtud proovikütmisi pilukoldega pliidil ja restkoldega tellisahjul. Kumbagi kütteseadet on köetud samadel tingimustel põlemisautomaatikaga ja ilma selleta ning analüüsitud kütmistel tekkinud suitsugaasi. Tulemusena saavutati puhtam põlemine mõlemas kütteseadmes, mis väljendub suitsugaasi madalamas vingugaasi sisalduses põlemisprotsessi kestel. Lisaks puhtamale suitsugaasile suurenes ka kütteseadmete kasutegur, mis on saadud kaudsel meetodil. Kuna tegemist on soojust salvestavate kütteseadmetega, on üheks oluliseks tulemuseks ka proovikütmistel automaatikaga saavutatud pikem põlemisprotsessi kestvus, mis annab soojusele aega salvestuda kütteseadme materjali. Täpsemate järelduste tegemiseks põlemisautomaatika kasulikkusest tuleks välja töötada selle katsetamise metoodika. Kasutaja seisukohalt on ehitatud põlemisautomaatika eeliseks turul müüdavatega see, et seadistamine seisneb põhimõtteliselt ühe seadeväärtuse määramises (liigõhutegur), mille väärtusel tahetakse kütteseadmes aset leidvat põlemisprotsessi juhtida.

Kuna põlemisõhu vajadus ei ole kogu põlemisprotsessi kestel konstantne, võiks diplomitöö käigus ehitatud põlemisautomaatikat täiendada temperatuuri mõõtmisega koldes, mille abil määrata ajavahemik, mil reguleerimine toimub hapnikuandurilt saadud tagasiside alusel. Põlemisautomaatika igapäevaseks kasutamiseks tuleks välja arendada veel kasutajaliides ja kasutada koldeukse andurit, mis võimaldaks põlemisprotsessi kestel ust lahti teha ilma, et täiendav põlemisõhu kogus automaatika tööd mõjutaks.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Veski, A.** (2005). Ahjud, pliidi, kaminad. Tallinn: Tormikiri OÜ. 212 lk.
2. **Bloch, M.** (2012). Heating your home with wood – consider efficiency and the environment. – Green Living Tips. [WWW] http://www.greenlivingtips.com/articles/wood-heaters-and-efficiency.html (16.03.2016).
3. **Mytting, L.** (2011). Küttepuud: kõik puude lõhkumisest, ladumisest ja kuivatamisest ning puuküttе olemusest. Tallinn: Sinisukk. 215 lk.
4. **Arumäe, T., Kimmel, V., Kupri, H. L., Maasikamets, M., Roots, O., Teinemaa, E., Vainumäe, K.** (2015). Emissions from burning municipal solid waste and wood in domestic heaters. – Atmospheric Pollution Research xxx (2015): 1 – 9. [WWW] http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104215000781 (17.03.2016).
5. **Laurson, J.** (2015). Kas hävitame ahiküttе! – Majaleht. [WWW] http://www.majaleht.ee/templ/index.php?page=194&lang=7 (16.03.2016).
6. Metsandus. – Keskkonnaministeerium. [WWW] http://envir.ee/et/metsandus (17.03.2016).
7. **Press – Kristensen, K.** (2013). Small chimneys – big emissions. – Air Pollution & Climate Secretariat. Nr. 3. [WWW] http://www.airclim.org/acidnews/small-chimneys-–-big-emissions (17.03.2016).
8. **Heintalu, H., Kohv, N., Link, A., Mandel, E.** (2012). Estonian Informative Inventory Report 1990 – 2010. Tallinn: Estonian Environmental Information Centre. [WWW] http://www.keskkonnainfo.ee/failid/Estonian_IIR_2012.pdf (17.03.2016).
9. **Griffiths, S.** (2014). Why sitting by the fire is so relaxing: Staring at flickering light awakens our inner caveman – and even causes our blood pressure to drop. – Mail Online. Nr. 11. [WWW] http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2834468/Why-sitting-fire-relaxing-Staring-flickering-light-awakens-inner-caveman-causes-blood-pressure-drop.html (18.03.2016).
10. The Argument In Favor Of Wood Heating. – The Wood Heat Organization. [WWW] http://www.woodheat.org/argument.html (18.03.2016).
11. **Knoef, H., Quaak, P., Stassen, H.** (1999). Energy from Biomass: A Review of Combustion and Gasification Technologies. Washington, D. C: The World Bank. 80 lk.
12. Põlemine. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Mehaanikateaduskond. [WWW] https://www.ttu.ee/public/m/Mehaanikateaduskond/Instituudid/soojustehnika-instituut/oppematerjalid/kyte-ventilatsioon/12._Polemine.pdf (19.03.2016).

13. **Kask, Ü., Muiste, P., Pihu, T., Soosaar, S., Vares, V.** (2005). Biokütuse kasutaja käsiraamat. Tallinn: TTÜ Kirjastus. [WWW] http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/f/fa/Vares,_V._jt._Biokütuse_kasutaja_kasiraamat.pdf (21.03.2016).
14. **Klobut, K., Paloposki, T., Saastamoinen, J., Tuomaala, P.** (2012). Analysis of wood firing in stoves by the oxygen consumption method and the carbon dioxide generation method. – Biomass and Bioenergy 61 (2014): 1 - 24. [WWW] http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195341100660X (22.03.2016).
15. **Kull, A., Mikk, I., Ots, A.** (1966). Soojustehnika. Tallinn: Valgus. 493 lk.
16. Wood for Energy Production: Technology – Environment – Economy. (2005). Dublin: GOFORD. [WWW] http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/projectreports/wood_for_energy_production.pdf (22.03.2016).
17. **Nussbaumer, T.** (2003). Combustion and Co – combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies and Primary Measures for Emission Reduction. – Energy and Fuels (2003): 1510 – 1521. [WWW] http://www.verenum.ch/Publikationen/comb%20_cocomb.pdf (29.03.2016). (oli nr 3)
18. **Hrdlička, J., Plaček, V., Šulc, B., Vrána, S.** (2010). Ecological Aspects of Small – Scale Biomass Combustion Control. – Development, Energy, Environment, Economics: 388 – 393. [WWW] http://www.wseas.us/e-library/conferences/2010/Tenerife/DEEE/DEEE-66.pdf (30.03.2016). (oli nr 4)
19. Ehitus ja elumajandus. – Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium. [WWW] https://www.mkm.ee/et/eesmargid-tegevused/ehitus-ja-elamumajandus (30.03.2016).
20. Combustion Analysis Basics: An Overview of Measurements, Methods and Calculations Used in Combustion Analysis. (2004). TSI Incorporated. [WWW] http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Handbooks/CA-basic-2980175.pdf (31.03.2016).
21. Kahhelahjud/krohvitud pinnaga ahjud. [WWW] https://www.evs.ee/tooted/evs-en-15544-2009 (31.03.2016).
22. Tahkel kütusel töötavad aeglaselt soojust eraldavad kütteseadmed. [WWW] https://www.evs.ee/tooted/evs-en-15250-2007 (31.03.2016).
23. **Forsberg, B., Kaasik, M., Kimmel, V., Lai, T., Merisalu, E., Orru, K., Orru, H., Tamm, T., Teinemaa, E.** (2010). Peened osakesed välisõhus ja neist tuleneva tervisemõju hindamine Tallinnas, Tartus, Kohtla – Järvel, Narvas ja Pärnus. – *Eesti Arst* (2010): 242 – 250. [WWW] http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/f/f5/Eesti_Arst._Peened_osakesed_välisõhus_ja

_neist_tuleneva_tervisemõju_hindamine_Tallinnas,_Tartus,_Pärnus,_Kohtla-Järvel,_Narvas_ja_Pärnus._2010.pdf (31.03.2016).

24. **Obernberger, I., Thek, G.** (2010). The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilisation of Pellets. United Kingdom: MPG Books. [on – line] google books (31.03.2016).
25. **Bull, S.** (2009). Carbon monoxide: General information. Health Protection Agency. [WWW] https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/337628/hpa_carbon_monoxide_general_information_v3.pdf (01.04.2016).
26. **Ortega, M.** (2008). Improved combustion in wood stoves. Norway: Norwegian University of Science and Technology. [WWW] https://daim.idi.ntnu.no/masteroppgaver/004/4347/masteroppgave.pdf (01.04.2016).
27. **Dedov, A.** (2015). Soojustehnilised mõõtmised: Rõhu mõõtmine. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool: Soojustehnika Instituut. [WWW] http://www.tud.ttu.ee/im/Andrei.Dedov/Soojustehnilised%20m%F5%F5tmised/Materjalid/Loengud_2015/R%F5hu%20m%F5%F5tmine.pdf (01.04.2016).
28. Toru – Jüri OÜ. (2015). Malmkatla VIADRUS U22 kasutamise ja paigaldamise juhend. Eesti: Viljandi. [WWW] http://torujyri.ee/webfm_send/15 (03.04.2016).
29. An Early History Of Comfort Heating. (2001). – *The News.* [WWW] http://www.achrnews.com/articles/87035-an-early-history-of-comfort-heating (03.04.2016).
30. **Bennett, S.** A History of Control Engineering, 1930 – 1955. [on – line] google books. (03.04.2016).
31. **Bennett, S.** (1996). A Brief History of Automatic Control. IEEE Control Systems. [WWW] http://ieeecss.org/CSM/library/1996/june1996/02-HistoryofAutoCtrl.pdf (03.04.2016).
32. **Dilawari, J. S., Sandhu, G. S.** A Review Paper on Microprocessor based Controller programming. India: GTBKIET, Pacific University. [WWW] http://arxiv.org/pdf/1210.0576.pdf (03.04.2016).
33. **Houck, J. E., Tiegs, P. E.** (1998). Residential Wood Combustion Technology Review: Volume 1. Technical Report. USA: OMNI Environmental Services. [WWW] https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch01/related/woodstove.pdf (04.04.2016).
34. **Andersson, A.** (2010). Küttepuu soojusenergia allikana Eesti kodudes. – *Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine.* TEUK XII – Kaheteistkümnende konverentsi kogumik. Tartu: Eesti Maaülikool. 11 – 18. [WWW] http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/5/59/TEUK_XII._Taastuvate_energiaallikate_uurimine_ja_kasutamine.2010.pdf (04.04.2016).

35. **Eng, P., Sauvé, T.** (2014). Small Biomass Boiler Technology. – *Ontario.* [WWW] http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/14-009.htm (04.04.2016).
36. **Bollman, M.** (2014). Automated Wood Stove Features Entering the Marketplace. – *Heated Up.* [WWW] http://forgreenheat.blogspot.com.ee/2014/10/automated-wood-stove-features-entering.html (05.04.2016).
37. **Ackerly, J.** (2013). Reinventing the Wood Stove: Vital to Wood Heat's Future. – *Biomass Magazine.* [WWW] http://biomassmagazine.com/articles/9340/reinventing-the-wood-stove-vital-to-wood-heatundefineds-future (05.04.2016).
38. Controllers for traditional stoves and furnaces with heat storage system. – *Tatarek.* [WWW] http://tatarek.com.pl/en/automation/controllers-traditional-stoves-and-furnaces-heat-accumulation/rt8os-g (05.04.2016).
39. Tatarek. (2015). User manual v.3.0: Fireplace OS2 (RT – 08G – OS2). [WWW] http://tatarek.com.pl/files/img/eng_user_manual_rt08gos2.pdf (06.04.2016).
40. **Jones, L., McDonald, J.** (2000). Demonstration of Tier 2 Emission Levels for Heavy Light – Duty Trucks. – *SAE Technical Paper Series.* USA: U.S.EPA – Office of Transportation and Air Quality. [WWW] https://www.researchgate.net/publication/235343557_Demonstration_of_Tier_2_Emission_Levels_for_Heavy_Light-Duty_Trucks (06.04.2016).
41. Bosch – Invented for life. (2016). Lambda Sensor LSU 4.9. Germany. [WWW] http://www.bosch-motorsport.de/media/catalog_resources/Lambda_Sensor_LSU_49_Datasheet_51_en_2779147659pdf.pdf (06.04.2016).
42. Testo 350: Combustion & Emission Analyzer: Instruction manual. [WWW] http://www.testo350.com/downloads/350/literature-manuals/2-%20testo%20350%20Instruction%20Manual.pdf (08.04.2016).
43. Innovate Motorsports: MTX – L Digital Air/Fuel Ratio Gauge: User Manual. [WWW] http://www.innovatemotorsports.com/support/manual/MTX-L_print%201.2.pdf (09.04.2016).
44. Bosch. (2001). Technical Customer Information: Planar Wide Band Lambda Sensor. [WWW] http://www.daytona-sensors.com/download/Bosch_LSU4.pdf (09.04.2016).
45. Raspberry Pi. What is a Raspberry Pi? United Kingdom. [WWW] https://www.raspberrypi.org/help/what-is-a-raspberry-pi/ (10.04.2016).
46. Raspberry Pi 2 & 3 Pin Mappings. Microsoft: Developer technologies. [WWW] https://ms-iot.github.io/content/en-US/win10/samples/PinMappingsRPi2.htm (11.04.2016).
47. **Grunis, M.** Serial Peripheral Interface (SPI). – *Sparkfun.* [WWW] https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi (11.04.2016).

48. Introducing the Raspberry Pi 2 – Model B: Overview. – *Adafruit.* [WWW] https://learn.adafruit.com/introducing-the-raspberry-pi-2-model-b?view=all (12.04.2016).
49. GPIO Electrical Specifications: Raspberry Pi input and output pin voltage and current capability. – Mosaic Documentation Web. [WWW] http://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/microcontroller-projects/raspberry-pi/gpio-pin-electrical-specifications (12.04.2016).
50. What is an Oxygen Sensor? – *The Oxygen Sensor Specialist.* [WWW] http://o2sensors.com.au/static/what-is-oxygen-sensor (13.04.2016).
51. **Paul, P. J.** Energy from Biomass. India: Indian Institute of Science. [WWW] http://www.mineco.gob.es/stfls/MICINN/Investigacion/FICHEROS/Presentacion_participantes_Sevilla/15_Energy_from_Biomass_P_Paul.pdf (03.04.2016).
52. Oxygen Sensor History. – Walker [WWW] http://www.walkerproducts.com/o2-sensor-training-guide/history (14.04.2016).
53. Emission Standards: Cars and Light Trucks. European Union. – *DieselNet.* [WWW] https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php (14.04.2016).
54. Products: O2 – Gas Sensors. – Itg. [WWW] http://www.it-wismar.de/index.php?content=g1&PHPSESSID=ns17f130h3gh3jg1mav4mlf5i3 (15.04.2016).
55. Lambdaanduri saladus. Saksamaa: NGK Spark Plug Europe GmbH. [WWW] https://issuu.com/autoekspert/docs/lambdaandurid_est/6 (15.04.2016).
56. Lmbda sensors: Broadband lamda sensor. Germany: NGK Spark Plug Europe GmbH. [WWW] https://www.ngk.de/en/products-technologies/lambda-sensors/lambda-sensor-technologies/broadband-lambda-sensor (15.04.2016).
57. Lambda oxygen sensors: "Lambda" oxygen sensor, Type LSM 11. – Bosch. [WWW] http://www.vems.hu/files/widebando2/LSM11.pdf (16.04.2016).
58. Product Search. – Driving Embedded Excellence: ETAS. [WWW] http://www.etas.com/en/products/product_search.php (17.04.2016).
59. **Kasap, S.** (2001). Thermoelectric Effects in Metals: Thermocouples. Canada: University of Saskatchewan. [WWW] http://materials.usask.ca/samples/thermoelectric-seebeck.pdf (17.04.2016).
60. MAX6675 Temp Module Arduino Manual and Tutorial. – *Henry's Bench.* [WWW] http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-temperature-measurements/max6675-temp-module-arduino-manual-and-tutorial/ (17.04.2016).
61. Stepper vs. Servo. – *AMCI.* Advanced Micro Controls Inc. [WWW] http://www.amci.com/tutorials/tutorials-stepper-vs-servo.asp (18.04.2016).

62. OpenAir: Air damper actuators for power and flexibility. – *Siemens.* [WWW] http://www.siemens.com.tw/buildingtechnologies/40_Linking_Documents/Solutions_Products/CPS/OpenAir.pdf (20.04.2016).
63. The complete product range of general air solutions. (2015). Belimo. [WWW] http://www.azimutkft.hu/downloads/segedletek/overview_air_en.pdf (20.04.2016).
64. Products: 1.8 Degree Size 42 mm 2 – Phase High Torque Hybrid Stepper Motor. – *SunCor Motor.* [WWW] http://www.suncormotor.com/Products/1468325853.html (21.04.2016).
65. Samm – mootoriga ajamid. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. [WWW] http://www.ene.ttu.ee/elektriajamid/oppeinfo/materjal/AAV0040/Samm-mootoriga_ajamid.pdf (21.04.2016).
66. A4988 Stepper Motor Driver Carrier. – Pololu Robotics & Electronics. [WWW] https://www.pololu.com/product/1182 (21.04.2016).
67. Tutvumine Pythoniga. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli informaatikainstituut. [WWW] http://scratch.ttu.ee/failid/Python_sisse.pdf (23.04.2016).
68. **Dusink, L., Hall, P.** (1989). Software Re – use, Utrecht 1989. The Netherlands: Springer – Verlag Berlin Heidelberg GmbH. [on – line] google books. (23.04.2016).
69. Elektriajamid: Automaatjuhtimissüsteemi PID – reguleerimine. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. [WWW] http://www.ene.ttu.ee/elektriajamid/Leonardo/automaatika/Auto5.pdf (25.04.2016).
70. PID regulaator. – Network of Excellence Robotic & Mechatronics: *HomeLab Community*. [WWW] http://home.roboticlab.eu/et/projects/3pi/pid (25.04.2016).
71. **Horttanainen, P., Jokiniemi, J., Lamberg, H., Nuutinen, K., Sippula, O., Sutinen, J., Tissari, J**. (2014). Effect of air staging on fine particle, dust and gaseous emissions from masonry heaters. – *Biomass and Bioenergy 67 (2014):* pp. 167 – 178. [WWW] http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953414002396 (27.04.2016).

CONTROL AUTOMATICS FOR BURNING PROCESS IN OVEN

Summary

The aim of this master's thesis was to study how burning automation devices help to reduce emissions emitted from ovens, making them more efficient and easier to handle. Therefore research is carried out among burning automatics available in the market. More in detail author looked into burning automatics produced by Polish company Tatarek, which can be bought and installed by several small businesses that build masonry heaters in Estonia. Addition to getting more familiar with product manuals, flue gas analyses are conducted with oven that had Tatarek automation installed. It turned out that burning automatics which are based on feedback of the furnace temperature need great deal of adjustments to work properly. Furthermore the outcome of the adjustments can be weak when burning conditions like chimney draught and amount of the fuel changes.

Having collected enough information about burning automatics, author got an idea to build one himself. Idea was to build automatics that is based on oxygen content feedback in flue gas not on furnace temperature. Furthermore interesting is that oxygen sensor used in this project is meant to measure oxygen content in car exhaust. Before that comparison measurements are performed with gas analyzer Testo 350 to make sure that sensor is capable to work in flue gas that is generated by biomass combustion. After getting positive results all the other hardware is chosen to build device that controls the burning process through the combustion air amount let inside the furnace. From hardware there is Raspberry Pi that acts as control unit, air damper which is motorized with steppermotor and thermocouple with amplifier to measure temperatures. To make the system work the code is written in programming language Python. For simplicity the code is divided into four modules that deal with data measured by oxygen sensor, control of the steppermotor, temperatures measured by thermocouple and with PID loop. These modules work independently but in this particular project they are imported into main code and acting together.

For configurations and to verify the performance of designed automatics there are several burning tests carried out with stove in the Estonian University of Life Science's boiler

laboratory that has improved air staging and with conventional masonry heater in author's home. Among both furnace the burning tests were committed upon automation and without it in same conditions. As a result burns with automation were considerably cleaner, more efficient and longer lasting. All these aspects are important, especially noticeable was longer burn duration that has great impact on furnaces that are meant to store heat. Form user point of the view built combustion control automatics is easier to configure compared to devices that are based on feedback of furnace temperature.

During the use of automation couple of ideas also came to mind how to furthermore improve the device. First of all for everyday use there has to be some simple user interface. Secondly because combustion air need is not constant during the entire process therefore oxygen content based control time has to be defined. Good way to do this is measure furnace temperature, if it goes above certain value the oxygen sensor takes over the control of combustion process. And if the temperature falls below predefined value then combustion air control is cancelled. At last there should be door position sensor added to system then the control unit recognizes the excess air pulled into furnace and acts accordingly.

LISAD

Lisa 1. Põhikood

```
import pid as pid
from time import sleep
import samm2
import os
import lambda1
import max6675

# Määratakse PID tsükkli peamised seadeväärtused:
p=pid.PID(2, 1, 0, Integrator_max=-1, Integrator_min=-17)
# Määratakse soovitud lambda (kasutatakse PID tsüklis):
p.setPoint(1.3)
motorPos = 0
# Klapp tehakse 100 % lahti (50 sammu = 90 kraadi):
samm2.rotateToPos(50, motorPos)
motorPos = 50

while True :
   start = raw_input('Kas hakkan reguleerima (kirjuta JAH):')
   if start == 'JAH':
      try:
         while True:
            os.system('clear')
            localtime = time.asctime( time.localtime(time.time()) )
# PID ploki väljund imporditakse vastavalt liigõhuteguri näidule:
                        x = (p.update(lambda1.lam()))*1
            sleep(1.0)
            print x
            desiredPos = 50 + int(x)
            if (desiredPos<0):
               desiredPos = 0
            if (desiredPos>50):
               desiredPos=50
```

```
            print '       '+str(max6675.temp())+'       ',str(lambda1.lam())+'
',str(desiredPos)+'       ',str(localtime)
            print 'Lambda nait:  '+str(lambda1.lam())+ ' PID arvutatud klapi asend:
',str(desiredPos)
            samm2.rotateToPos(desiredPos, motorPos )
# Järgmiseks tsükliks antakse ette mootori asend:
            motorPos = desiredPos
        except KeyboardInterrupt:
            samm2.rotateToPos(0, motorPos)
            exit()
    else:
        pass
```

Lisa 2. Hapnikuanduri mooduli kood

```
import spidev
import time
import os

# Avatakse SPI andmesideliini protokoll:
spi = spidev.SpiDev()
spi.open(0,0)

# Defineeritakse fuktsioon, lugemaks infot MCP3008 adc muundurilt
# sisendkanaleid on MCP3008-l täisarv '0-7':
def ReadChannel(channel):
  adc = spi.xfer2([1,(8+channel)<<4,0])
  data = ((adc[1]&3) << 8) + adc[2]
  return data

# Funktsioon info-pingeks vastavalt hapnikuanduri
# makisimum väljundile 3.3 V, pinged ümardatakse:
def ConvertVolts(data,places):
  volts = (data * 3.3) / float(1023)
  volts = round(volts,places)
  return volts

# Funktsioon info-lambda näit
# vastavalt kontrolleri väljundi seadistusele:
def ConvertLamb(data,places):

# ADC      Lambda   Volts
#   0        0.5     0.00
# 512       4.25    1.65
# 1023       8      3.3

  lamb = ((data * 7)/float(1023))+1
```

```
  lamb= round(lamb,places)
  return lamb

# Defineeritakse kasutatud kanalid:
lamb_channel  = 1

# Defineeritakse tulemuste sagedus:
delay = 5
def lam ():
  count = 0
  while count < 1 :

 # Loetakse hapnikuandurilt saadavat infot:
    lamb_level = ReadChannel(lamb_channel)
    lamb_volts = ConvertVolts(lamb_level,1)
    lamb       = ConvertLamb(lamb_level,1)
    count = count + 1
```

Lisa 3. Samm–mootori juhtimise mooduli kood

```
import sys
import RPi.GPIO as GPIO
import time

# Määratakse viigud samm-mootori juhtimiseks:
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(23, GPIO.OUT)
GPIO.setup(24, GPIO.OUT)
count = 0

# Defineeritakse funktsioon mootori pööramiseks positsiooni järgi:
def rotateToPos(desiredPos, motorPos):
    num_steps = abs(motorPos - desiredPos)
    if(desiredPos > motorPos):
        SpinMotor(True, num_steps)
    else:
        SpinMotor(False, num_steps)

# Defineeritakse funktsioon, mis arvestab pööramise suunda:
def SpinMotor(direction, num_steps):
    GPIO.output(23, direction)
    while num_steps > 0:
        GPIO.output(24, True)
        GPIO.output(24, False)

# Määratakse juhtsignaalide edastamise ehk mootori pööramise kiirus:
        time.sleep(0.1)
        num_steps -= 1
```

Lisa 4. Termopaari mooduli kood

```
import RPi.GPIO as GPIO
import time

# Tehakse klass MAX6675:
class MAX6675(object):
    def __init__(self, cs_pin, clock_pin, data_pin, units = "c", board = GPIO.BCM):
    self.cs_pin = cs_pin
    self.clock_pin = clock_pin
    self.data_pin = data_pin
    self.units = units
    self.data = None
    self.board = board

# Määratakse kasutatavad viigud:
    GPIO.setmode(self.board)
    GPIO.setup(self.cs_pin, GPIO.OUT)
    GPIO.setup(self.clock_pin, GPIO.OUT)
    GPIO.setup(self.data_pin, GPIO.IN)
    GPIO.output(self.cs_pin, GPIO.HIGH)

# Funktsioon, mis loeb SPI porti ja väljastab temperatuuri:
  def get(self):
    self.read()
    self.checkErrors()
    return getattr(self, "to_" + self.units)(self.data_to_tc_temperature())

# Funktsioon, mis salvestab info 16 biti registrisse täisarvudena:
  def read(self):
    bytesin = 0
    GPIO.output(self.cs_pin, GPIO.LOW)
    for i in range(16):
      GPIO.output(self.clock_pin, GPIO.LOW)
```

```
            time.sleep(0.001)
            bytesin = bytesin << 1
            if (GPIO.input(self.data_pin)):
                bytesin = bytesin | 1
            GPIO.output(self.clock_pin, GPIO.HIGH)
        time.sleep(0.001)
        GPIO.output(self.cs_pin, GPIO.HIGH)
        self.data = bytesin

# Funktsioon, mis kontrollib termopaari tööd:
    def checkErrors(self, data_16 = None):
        if data_16 is None:
            data_16 = self.data
        noConnection = (data_16 & 0x4) != 0
        if noConnection:
            raise MAX6675Error("No Connection")

# Funktsioon, mis konverteerib täisarvudest temperatuuri:
    def data_to_tc_temperature(self, data_16 = None):
        if data_16 is None:
            data_16 = self.data
        tc_data = int(int(data_16 >> 3) & 0xFFF)
        return int(tc_data * 0.25)

# Funktsioon, mis väljastab temperatuuri °C:
    def to_c(self, celsius):
        '''Celsius passthrough for generic to_* method.'''
        return celsius

# Puhastatakse määratud viigud:
    def cleanup(self):
        GPIO.setup(self.cs_pin, GPIO.IN)
        GPIO.setup(self.clock_pin, GPIO.IN)
```

```
# Peafuktsioon temperatuuri lugemiseks:
def temp ():
    count = 0
    cs_pin = 16
    clock_pin = 21
    data_pin = 20
    units = "c"
    thermocouple = MAX6675(cs_pin, clock_pin, data_pin, units)

    while count < 1 :
        try:
            tc = thermocouple.get()
        except MAX6675Error as e:
            tc = "Error: "+ e.value
            time.sleep(3)
        count = count +1
    return tc
```

Lisa 5. PID–regulaatori mooduli kood

```
# Tehakse klass PID:
class PID:

    def __init__(self, P=0, I=0, D=0, Derivator=0, Integrator=0, Integrator_max=50,
Integrator_min=0):
        self.Kp=P
        self.Ki=I
        self.Kd=D
        self.Derivator=Derivator
        self.Integrator=Integrator
        self.Integrator_max=Integrator_max
        self.Integrator_min=Integrator_min
        self.set_point=0.0
        self.error=0.0

# Funktsioon, mis arvutab PID tsükli tulemi:
    def update(self,current_value):
        self.error = self.set_point - current_value
        self.P_value = self.Kp * self.error
        self.D_value = self.Kd * ( self.error - self.Derivator)
        self.Derivator = self.error
      self.Integrator = self.Integrator + self.error
        if self.Integrator > self.Integrator_max:
            self.Integrator = self.Integrator_max
        elif self.Integrator < self.Integrator_min:
            self.Integrator = self.Integrator_min
        self.I_value = self.Integrator * self.Ki

        PID = self.P_value + self.I_value + self.D_value
        return PID
```

```
# Defineeritakse PID tsüklis kasutatavad funktsioonid:
        def setPoint(self,set_point):
                self.set_point = set_point
                self.Integrator=0
                self.Derivator=0

        def setIntegrator(self, Integrator):
                self.Integrator = Integrator

        def setDerivator(self, Derivator):
                self.Derivator = Derivator

        def setKp(self,P):
                self.Kp=P

        def setKi(self,I):
                self.Ki=I

        def setKd(self,D):
                self.Kd=D

        def getPoint(self):
                return self.set_point

        def getError(self):
                return self.error

        def getIntegrator(self):
                return self.Integrator

        def getDerivator(self):
                return self.Derivator
```

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, _____,

(*autori nimi*)

sünniaeg _____,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö

_____

_____

_____,

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on_____,

(*juhendaja(te) nimi*)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____

(*allkiri*)

Tartu, _____

(*kuupäev*)

_____

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ _____

(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)

_____ _____

(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)