



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

EXPERIMENTÁLNÍ REALIZACE ELEKTROSTATICKÉHO ODLUČOVAČE PRO DOMOVNÍ KOTEL SPALUJÍCÍ DŘEVNÍ PALIVA

ELECTROSTATIC PRECIPITATOR FOR HOUSEHOLD WOOD FIRING BOILER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Preisler

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marian Brázdil, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Lukáš Preisler**
Studijní program: Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Marian Brázdil, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Experimentální realizace elektrostatického odlučovače pro domovní kotel spalující dřevní paliva

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Emise tuhých částic z malých domovních spalovacích zařízení – krbů, krbových vložek, kamen nebo teplovodních kotlů představují významný zdroj znečišťujících látek v ovzduší. Elektrostatické odlučovače umožňují zachytávat tuhé částice v širokém spektru velikostních frakcí a představují jeden z možných způsobů redukce tuhých znečišťujících látek. Nacházejí uplatnění především u velkých průmyslových spalovacích zařízení, jejich nasazení je ale principiálně možné i u domovních spalovacích zařízení. Takovéto využití elektroodlučovačů není v současnosti příliš obvyklé. Náplní práce je provedení série experimentů, na základě kterých dojde ke zhodnocení aplikace kompaktního experimentálního elektrostatického odlučovače pro domovní spalovací zařízení, zejména jeho odlučovací účinnosti a elektrického příkonu a tím k ukázání možného potenciálu této technologie pro možné širší využití.

Cíle diplomové práce:

Návrh a sestavení experimentálního elektrostatického odlučovače pro domovní spalovací zařízení a jeho měřicí tratě.

Změření provozních parametrů elektrostatického odlučovače a vyhodnocení naměřených dat.

Návrh konstrukčních úprav elektrostatického odlučovače.

Seznam doporučené literatury:

PARKER, K. R. Applied Electrostatic Precipitation. 1st. ed. Springer, Netherlands, 1997. ISBN: 978-0-7514-0266-7

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vývojem experimentálního elektrostatického odlučovače pro domovní kotel spalující dřevní paliva. Nejprve byla provedena rešerše popisu elektrostatického odlučovače fyzikálními vztahy, na jejíž základě byl vytvořen výpočtový model. Dále byl aplikací výpočtového modelu proveden návrh konfigurace elektrostatického odlučovače a konstrukční návrh celkové aparatury. Zvolená konfigurace byla ověřena za pomoci měření korónového výboje, který vznikl při napětí 6,5 kV. Po provedení konstrukčních úprav byla navržená aparatura elektrostatického odlučovače sestavena a podstoupila měření v provozních podmínkách. Z důvodu kondenzace spalín a zatížení provozem nevznikl korónový výboj a jeho odlučivost nemohla být ověřena. Na základě měření byly navrženy konstrukční úpravy, vedoucí ke zprovoznění elektrostatického odlučovače. Hlavním požadavkem je povrchová úprava plechů, na kterých jsou zavěšeny nabíjecí dráty.

Klíčová slova

Elektrostatický odlučovač, spalování biomasy, korónový výboj, jemné částice, tuhé znečišťující látky

ABSTRACT

This diploma thesis aims on the development of an experimental electrostatic precipitator for household wood firing boiler. First, a literature review was conducted, aiming on the description of the precipitator using physical relations and, on its basis, a numerical model was created. By applying the numerical model, the precipitator configuration was designed as well as the engineering design of the whole system. The chosen configuration was validated by measurement using the corona discharge starting at voltage of 6,5 kV. By applying modifications, the electrostatic precipitator was built and tested during a running boiler. Due to flue gas condensation and load, corona discharge did not initiate, and the parameters were not validated. Modifications in the construction design were suggested leading to launch the electrostatic precipitator. The main requirement is a surface finishing of wire hinging components.

Key words

Electrostatic precipitator, biomass combustion, corona discharge, fine particles, particulate matter

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PREISLER, Lukáš. *Experimentální realizace elektrostatického odlučovače pro domovní kotel spalující dřevní paliva* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140222>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marian Brázdil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Experimentální realizace elektrostatického odlučovače pro domovní kotel spalující dřevní paliva** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Lukáš Preisler

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Marianu Brázdilovi, Ph.D. za připomínky a rady při návrhu zařízení, spolupráci při sestavování aparatury, zajištění nákupu materiálu a celkovou pomoc při vypracovávání závěrečné práce. Za práci na výrobě dílů děkuji Milanu Havlíčkovi. Dále děkuji doc. RNDr. Jozefu Ráhel'ovi, PhD. za zapůjčení a obsluhu vysokonapěťového zdroje a Ing. Jakubu Lachmanovi za zprovoznění a obsluhu kotle při měření.

OBSAH

Úvod.....	10
1 Elektrostatické odlučování částic	11
1.1 Princip elektrostatického odlučovače	11
1.2 Postup vývoje experimentálního zařízení elektrostatického odlučovače	12
2 Výpočtový model	13
2.1 Parametry spalovacího procesu	13
2.2 Distribuce velikosti vznikajících částic	15
2.3 Fyzikální principy výpočtového modelu	15
3 Návrh aparatury zařízení	21
3.1 Omezující požadavky pro návrh konfigurace.....	21
3.2 Konfigurace elektrostatického odlučovače.....	22
3.3 Konstrukční návrh	28
4 Měření korónového výboje	34
4.1 Aparatura k měření korónového výboje	34
4.2 Měření voltampérové charakteristiky	35
4.3 Zhodnocení korónového výboje	37
5 Realizace aparatury a měření	38
5.1 Přístrojové vybavení	38
5.2 Stav sestavené aparatury.....	40
5.3 Měření aparatury za provozu kotle	43
5.4 Návrh konstrukčních úprav	44
5.5 Návrh dalšího měření a úprav výpočtového modelu	45
Závěr.....	46
Seznam použitých zdrojů	47
Seznam použitých symbolů a zkratk	50
Seznam příloh.....	51

Úvod

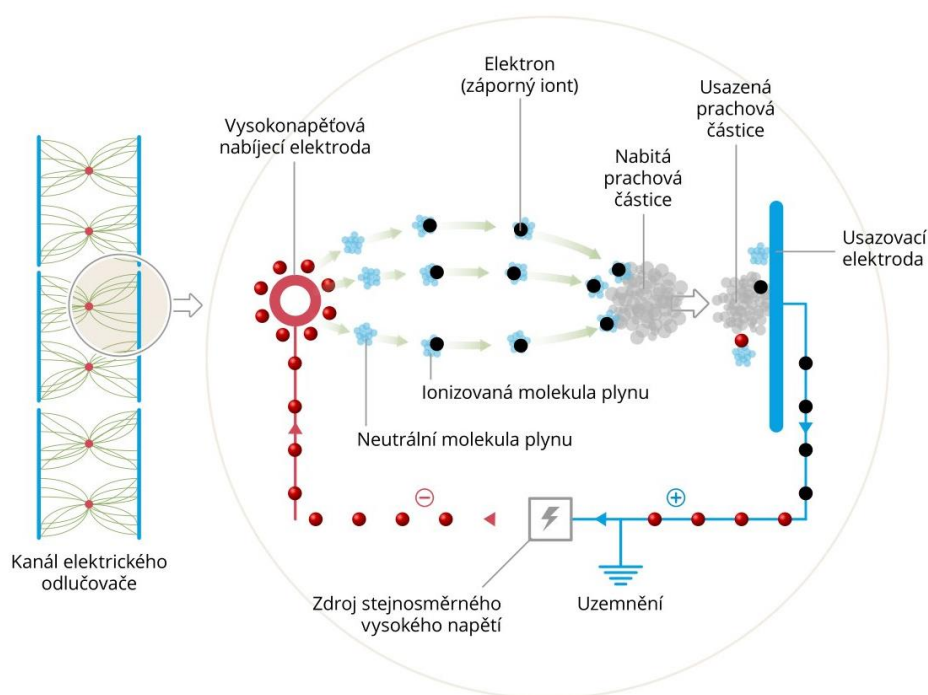
Vytápění domácností v lokálních topeništích na tuhá paliva je v ČR největší zdroj znečištění ovzduší suspendovanými částicemi PM_x (tuhá částice s velikostí $X \mu m$). Pro částice PM_{10} připadá na lokální topeniště necelých 60 % celkových primárních částic, u částic $PM_{2,5}$ hodnota dosahuje téměř 75 % [1]. Velké energetické celky, jako teplárny a tepelné elektrárny spalující uhlí a biomasu, mají v této statistice zastoupení pouze okolo 5 % pro částice PM_{10} i $PM_{2,5}$. Zásadním způsobem se na tom podepisuje, že emise lokálních topenišť s výkonem do 0,3 MW tepelného příkonu nejsou velkoplošně kontrolovány, zatímco velké energetické celky využívají všech dostupných technologií pro minimalizaci vypouštění škodlivin do ovzduší [2]. Velkou měrou se na separaci částic ze spalin podílí elektrostatický odlučovač. Ten je schopný u velkých energetických celků odloučit zhruba 99,9 % částic [3]. Technologie elektrostatického odlučování již existuje i pro lokální topeniště, ale cena takových zařízení mnohdy přesahuje cenu samotného kotle, zejména kvůli snaze maximalizovat účinnost odlučovače. Cílem této práce je navrhnout takový elektrostatický odlučovač s minimalizovaným napájecím napětím, který bude konstrukčně jednodušší, aby mohla být cena zařízení značně nižší než pořizovací cena kotle.

K dosažení výše uvedeného byly v práci nejprve popsány základní principy technologie elektrostatického odlučování a byl vytvořen výpočtový model, který pomocí fyzikálních vztahů popisuje chování částic a samotného odlučovače v různých podmínkách spalování. Výpočtový model byl vytvořen v prostředí programu MATLAB a graficky zobrazuje závislosti, ze kterých vychází návrh aparatury. Aparatura byla navržena v laboratorní místnosti s kotlem, na kterém probíhalo měření. Návrh aparatury byl tak omezen prostorovými požadavky místnosti. Konstrukční návrh zahrnuje výkresovou dokumentaci a 3D model, který byl vytvořen v prostředí programu Autodesk Inventor. Z navržené konfigurace bylo provedeno měření korónového výboje na jednom segmentu odlučovače. Měřením byl ověřen vznik záporného korónového výboje a nežádoucího jiskrového výboje, ze kterého vyplynuly konstrukční úpravy navržené aparatury. Aparatura elektrostatického odlučovače byla následně sestavena a měřena na kotli EkoScroll Alfa s jmenovitým tepelným příkonem 25 kW. Po spuštění kotle a ustálení spalování začaly spaliny v kouřovodech kondenzovat, což zamezilo vzniku korónového výboje a funkčnosti elektrostatického odlučovače. Na základě této skutečnosti byly navrženy konstrukční úpravy vedoucí ke zprovoznění elektrostatického odlučovače.

1 Elektrostatické odlučování částic

1.1 Princip elektrostatického odlučovače

Elektrostatický odlučovač (dále EO) se skládá ze dvou základních komponent. Jsou jimi nabíjecí a usazovací elektroda. Na nabíjecí elektrodu je přiváděn konstantní záporný potenciál, usazovací elektroda je uzemněna. Mezi elektrodami vzniká elektrické pole, ve kterém po překročení počátečního kritického napětí vzniká korónový výboj. Nejsnadněji vzniká korónový výboj na zakřivených plochách, což snižuje hodnotu počátečního kritického napětí. S výrazně rostoucím napětím na elektrodě přeskóčí při určité hodnotě jiskra, čímž přechází korónový výboj na jiskrový. Jiskrový výboj je zásadní problém při elektrostatickém odlučování [4]. Způsobuje poškození mechanických i elektrických komponent a výrazně snižuje účinnost, je proto potřeba pracovat s napětím, které má od jiskrového výboje dostatečnou rezervu. Při korónovém výboji dochází v blízkém okolí nabíjecí elektrody k ionizaci plynu. Důsledkem je vystřelování iontů, které se zachycují na odlučovaných částicích. Společně se částice s ionty pohybují směrem k usazovací elektrodě, kde se částice vybijí [5]. Schéma odlučování je uvedeno na obrázku 1.



Obr. 1 Princip elektrostatického odlučovače. Převzato z [6].

V oblasti mezi elektrodami se tvoří prostorový náboj, který částice odlučuje z důvodu jejich vyšší permitivity, než má nosný plyn. Částice jsou takto polarizovány. Mechanismus polarizace je dominantní u částic o velikosti více než $1\ \mu\text{m}$ a díky tomu je na částici přiváděn náboj i z širšího okolí samotné částice. Pro nabití tak není nutné přímé sražení iontu s částicí. U menších částic polarizace výrazně slábne. Pro částice menší $100\ \text{nm}$ je významný mechanismus difúze iontů. Tu vyvolávají elektrické síly a neuspořádaný náhodný pohyb molekul a iontů, zvaný Brownův pohyb [7]. Jakmile částice získá jedním ze způsobů náboj, začnou být ostatní ionty téže polarizace odpuzovány a částice je nábojem nasycována. Je proto potřeba natolik dlouhá nabíjecí a usazovací elektroda, aby částice stihla získat náboj,

přesunout se a zachytit na usazovací elektrodě. Rostoucí vrstva částic na usazovací elektrodě způsobuje úbytky napětí, které zvyšují počáteční kritické napětí pro vznik korónového výboje. Úbytek napětí je způsoben větším elektrickým odporem vrstvy a snížení zemního potenciálu. Při větší vrstvě částic také hrozí úlet částice zpět do proudu spalin. Je proto potřeba v určitých intervalech usazovací elektrodu čistit, což je vhodné pouze když spaliny kouřovodem neproudí. [8]

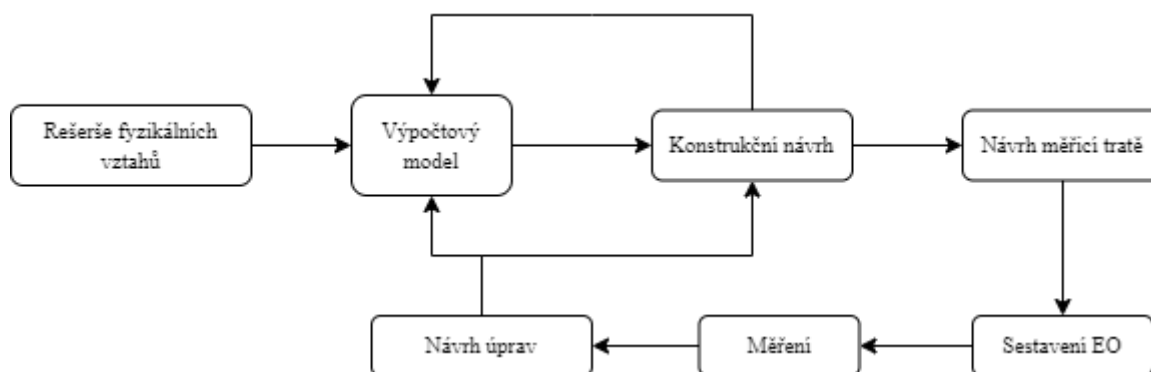
Z konstrukčního hlediska se EO dělí na dva základní typy: deska-drát a trubka-drát. Při konfiguraci deska-drát jsou mezi vzájemně rovnoběžnými plechy umístěny dráty s určitou roztečí. Takových plechů je obvykle větší množství, což také zvyšuje počet drátů. Takto jsou konfigurovány EO ve velkých průmyslových objektech s velkým množstvím vznikajících částic. Konfigurace trubka-drát je značně jednodušší, jelikož je uprostřed trubky umístěn pouze jeden drát. Hodí se více pro aplikace domovních kotlů, bude tak využita i v této diplomové práci. [8]

1.2 Postup vývoje experimentálního zařízení elektrostatického odlučovače

Vývoj koncepce aparatury EO probíhal dle schématického postupu, uvedeného na obrázku 2. Nejprve byla provedena rešerše fyzikálních popisů EO, ze kterého vzešel výpočtový model. Dle výpočtového modelu byl proveden konstrukční návrh. Navržená konfigurace byla aplikována do výpočtového modelu ke zjištění provozních charakteristik. Využitím dostupné přístrojové techniky byla navržena trať měřící klíčové parametry. Následně bylo zařízení sestaveno a měřeno na kotli spalujícím dřevní palivo. Dle měření byly navrženy úpravy v konstrukčním návrhu. Návrh EO byl proveden se zahrnutím níže uvedených požadavků.

Požadavky pro návrh experimentálního EO:

- konfigurace trubka-drát
- EO je nedílná součást kouřovodu
- kouřovod rozdělen na dvě větve: EO a bypass
- elektrické vlastnosti dle dostupného zdroje VN
- dostatečná účinnost pro jednoznačné určení odlučivosti
- aparaturu lze umístit do místnosti, kde se nachází kotel
- rozebíratelnost pro potřeby čištění
- dosažení maximální bezpečnosti v ochraně proti úrazu vysokým napětím



Obr. 2 Schéma postupu vývoje experimentálního EO.

2 Výpočtový model

K popisu EO na základě jeho fyzikálních veličin byl v prostředí programu MATLAB vytvořen výpočtový model. Pro nalezení výpočtových vztahů byla provedena rešerše literárních zdrojů, které princip elektrostatického odlučování popisují. Ač jde o technologii značně starou a ve velkých energetických celcích nyní nezbytnou, ucelený výpočtový model bohužel chybí. Na základě rešerše byly v kapitole 2.3 jednotlivé vztahy zaznamenány.

V diplomové práci [9] vytvářel Kantor výpočtový model, v prostředí Maple, který zanedbává některé nezbytné jevy a nepostihuje všechny proměnné veličiny. První část výpočtu tohoto autora se však zabývá čistě stechiometrickými výpočty spalovacího procesu na konkrétní spalovací zařízení a číselné hodnoty výpočtu byly využity jako vstupní hodnoty k výpočtovému modelu, dle kapitoly 2.1.

2.1 Parametry spalovacího procesu

První nezbytnou vstupní hodnotou výpočtu je typ paliva, který je ve spalovacím zařízení spalován. Jedná se o dřevní pelety typu A1. Chemické složení paliva bylo uvedeno autorem [10] a je v tabulce 1.

Tab. 1 Složení paliva – hmotnostní zastoupení jednotlivých složek [10]

Uhlík [%]	47,05
Vodík [%]	6,33
Síra [%]	0,031
Kyslík [%]	38,5
Dusík [%]	0,29
Vlhkost paliva [%]	7,61
Výhřevnost paliva [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]	17 150

Stanovené podmínky a naměřené veličiny, za kterých probíhalo spalování, jsou uvedeny v tabulce 2. Provozní komínový tah udává výrobce 12–16 Pa, tlak spalin je tak o 15 Pa vyšší než tlak vzduchu.

Tab. 2 Podmínky spalování

Tlak vzduchu [Pa]	101 325
Tlak spalin [Pa]	101 340
Teplota okolního vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]	20
Teplota spalin [$^{\circ}\text{C}$]	140
Relativní vlhkost vzduchu [%]	30
Součinitel přebytku vzduchu [-]	1,33
Hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	1,205

V níže uvedené tabulce 3 je složení spalovacího vzduchu, které vychází ze složení atmosféry při atmosférickém tlaku.

Tab. 3 Složení spalovacího vzduchu – objemová koncentrace složek

Dusík [%]	78,08
Kyslík [%]	20,95
Argon [%]	0,93
CO ₂ [%]	0,04

Dle stechiometrie spalování byl vypočten potřebný objem spalovacího vzduchu na 1 kg paliva. Hodnoty objemu vzduchu jsou v tabulce 4.

Tab. 4 Stechiometrický výpočet na 1 kg paliva

Minimální objem kyslíku [m ³]	0,6216
Objem suchého vzduchu [m ³]	2,9669
Objem vzduchu s přebytkem vzduchu [m ³]	3,9460
Minimální objem vlhkého vzduchu [m ³]	2,9798
Objem vlhkého vzduchu s přebytkem vzduchu [m ³]	3,9631

Z celkového objemu suchých spalin jsou v tabulce 5 uvedeny objemy jednotlivých látek suchých spalin s přebytkem vzduchu na 1 kg paliva.

Tab. 5 Objem spalin s přebytkem vzduchu na 1 kg paliva

Objem suchých spalin [m ³]	2,9801
Objem vodní páry [m ³]	0,79
Celkový objem vlhkých spalin [m ³]	3,7701

Z fyzikálních tabulek pro jednotlivé látky byly na základě softwarového nástroje CoolProp určeny celkové hodnoty použitých veličin. Uvedené teploty spalin odpovídají hodnotám, které uvádí výrobce kotle pro maximální výkon (148 °C) a pro 30 % výkon (119 °C). Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. 6 Fyzikální veličiny spalin za podmínek jmenovitého a 30% výkonu kotle

Dynamická viskozita spalin [Pa·s]	119 °C	20,26·10 ⁻⁶
	148 °C	21,46·10 ⁻⁶
Relativní permitivita spalin [-]	119 °C	1,000 504
	148 °C	1,000 504
Celková hustota spalin [kg·m ⁻³]	119 °C	0,89
	148 °C	0,83

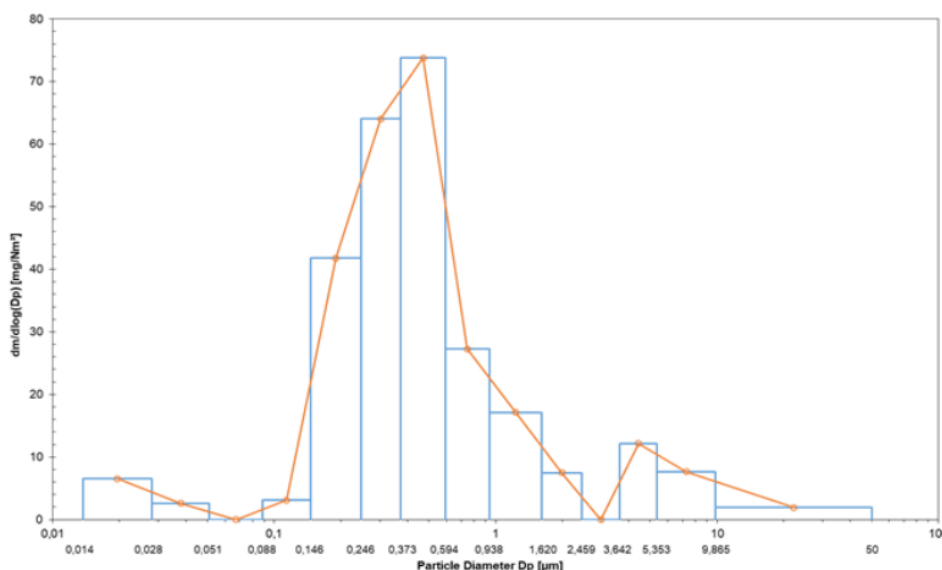
Z technických dat kotle EkoScroll ALFA byly doplněny do tabulky 7 vybrané parametry, vedoucí k výpočtu průtoku spalin, klíčovému parametru pro tvorbu výpočtového modelu [11]. Hodnota účinnosti kotle při sníženém výkonu nebyla výrobcem uvedena.

Tab. 7 Vlastnosti kotle

Výkon kotle [W]	Max. výkon	25 000
	30 % výkon	7500
Účinnost kotle [%]	Max. výkon	88
	30 % výkon	-
Množství paliva [$\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$]	Max. výkon	1,96
	30 % výkon	0,59
Hmotnost vznikajících spalin [$\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$]	Max. výkon	11,2
	30 % výkon	3,35
Průtok spalin [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]	Max. výkon	0,0134
	30 % výkon	0,0037

2.2 Distribuce velikosti vznikajících částic

Jako vstupní hodnota poměrného zastoupení částic byla do výpočtového modelu využita velikostní distribuce částic, naměřená na impaktoru DEKATI [12]. Jedná se o závislost hmotnosti částic pro danou velikostní frakci a je na obrázku 3. Měření distribuce bylo prováděno v první fázi hoření, kdy je produkováno větší množství spalin než v ustáleném stavu.



Obr. 3 Velikostní distribuce částic při spalování dřevních pelet. Převzato z [12].

2.3 Fyzikální principy výpočtového modelu

V této podkapitole jsou uvedeny vzorce, které vyplynuly z řešení výpočtů pro elektrostatické odlučování. Na základě těchto vzorců je proveden výpočet v softwaru MATLAB.

Pro vzájemné porovnání plynného média za různých podmínek je definována veličina relativní hustota plynu δ , která dává do poměru termodynamickou teplotu a tlak za normálních podmínek ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $101\,325\text{ Pa}$) a teplotu a tlak ve spalinách dle rovnice 2.1.

$$\delta = \frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T} \quad (2.1)$$

Pro elektrický přenos náboje mezi částicemi, spouštějící elektrostatische odlučování, je nejprve potřeba dosáhnout korónového výboje. Podmínka vzniku korónového výboje je dosažení počáteční intenzity elektrického pole E_0 . Její hodnota je pro neznečištěný vzduch určena rovnicí 2.2 [3]. Z důvodu nejasného popisu elektrického pole ve znečištěném plynu bylo znečištění zanedbáno.

$$E_0 = k_1 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{k_2}{\sqrt{\delta \cdot r_{nab}}} \right) \quad (2.2)$$

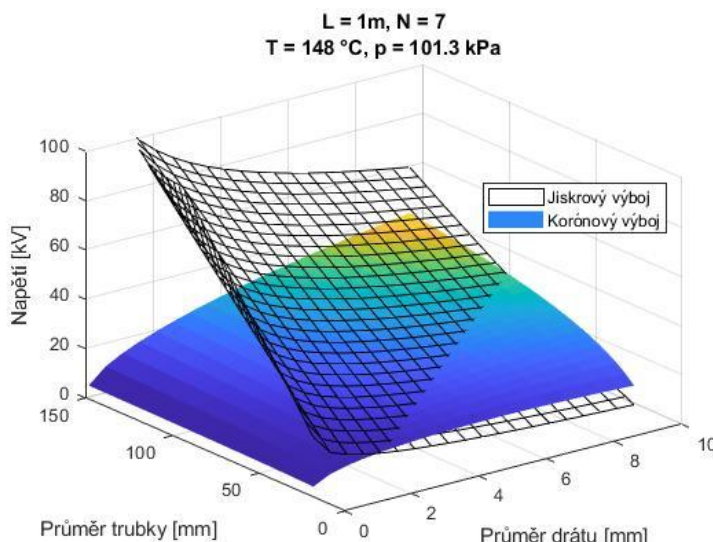
Ve vzorci jsou použity empirické hodnoty pro korónový výboj záporné polarity $k_1 = 31,02 \cdot 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ a $k_2 = 0,0308 \text{ m}^{0,5}$. Veličina r_{nab} udává poloměr nabíjecí elektrody, kterou je drát, přivádějící do EO vysoké napětí. Z literatury [13] je zřejmé, že pro vznik korónového výboje je vhodný co nejzakřivenější povrch, v našem případě co nejmenší poloměr drátu. V souvislosti se vznikem korónového výboje je další důležitou veličinou kritické napětí U_0 , které závisí právě na intenzitě elektrického pole. Vztah pro výpočet kritického napětí je určen rovnicí 2.3 [14].

$$U_0 = E_0 \cdot r_{nab} \cdot \ln \left(\frac{R_{us}}{r_{nab}} \right) \quad (2.3)$$

V rovnici je R_{us} poloměr usazovací elektrody, v praktickém případě se pak používá průměr trubky, jakožto dvojnásobek poloměru usazovací elektrody. S rostoucím R_{us} vzniká korónový výboj za vyššího napětí, ale s klesajícím R_{us} roste riziko vzniku nežádoucího jiskrového výboje. Napěťové podmínky vzniku jiskrového výboje U_s jsou uvedeny rovnicí 2.4 [8].

$$U_s = k_1 \cdot \ln \left(\frac{R_{us}}{r_{nab}} \right) \cdot (0,1 \cdot \delta \cdot R_{us} + k_2 \cdot \sqrt{0,1 \cdot \delta \cdot R_{us}}) \quad (2.4)$$

V rovnici jsou konstanty k_1 a k_2 totožné, jako pro počáteční intenzitu elektrického pole E_0 . Z průběhu kritického napětí pro vznik korónového a jiskrového výboje je na obrázku 4 znázorněna závislost na průměru trubky a drátu, tedy usazovací a nabíjecí elektrody. Obě plochy vyjadřují počáteční napětí, které při překročení způsobuje vznik daného výboje. Oblast, kde je plocha korónového výboje pod plochou jiskrového výboje, je žádoucí. V opačném případě hrozí vznik výboje jiskrového. Z grafu tedy vyplývá, v jakém rozmezí se musí pohybovat poloměr nabíjecí a usazovací elektrody pro zabezpečení bezproblémového vzniku korónového výboje a zamezení vzniku výboje jiskrového. Je potřeba nastavit napětí vyšší, než udává plocha korónového výboje, ale menší, než udává plocha jiskrového výboje.



Obr. 4 Graf závislosti kritického napětí na veličinách R_{us} a r_{nab} .

Překročením kritického napětí pro korónový výboj a postupným růstem napětí začíná skrze plynné médium pomocí záporně nabitých iontů procházet elektrický proud. Voltampérová charakteristika EO je určena rovnicí 2.5 [15].

$$i = N \cdot b_i \cdot G \cdot U \cdot (U - U_0) \quad (2.5)$$

V rovnici i značí lineární proudovou hustotu, N počet trubek usazovacích elektrod, b_i je pohyblivost iontů, jejíž vztah je uveden níže rovnicí 2.7, a G je koeficient konfigurace, určený podle rovnice 2.6. Vztah je opět pro zjednodušení pro čistý vzduch. V případě znečištění plynu prachem se voltampérová charakteristika posouvá k vyššímu napětí a protéká menší množství elektrického proudu [16].

$$G = \frac{8 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1}{R_{us}^2 \cdot \ln\left(\frac{R_{us}}{r_{nab}}\right)} \quad (2.6)$$

V rovnici 2.6 je ε_0 absolutní permitivita vakua a ε_1 relativní permitivita plynného média podle Tab. 6. Hodnota absolutní permitivity vakua odpovídá hodnotě $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$. V rovnici 2.7 je uveden vztah pohyblivosti iontů.

$$b_i = \frac{b_0}{\delta} \quad (2.7)$$

V této rovnici je b_0 konstanta pohyblivosti iontů za normálních podmínek a při předpokládaném složení plynu odpovídá hodnotě $b_i = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [4]. Pro převod jednotkového elektrického proudu, protékajícího mezi nabíjecí a usazovací elektrodou, na elektrický proud I je lineární proudová hustota vynásobená délkou nabíjecí elektrody L podle rovnice 2.8.

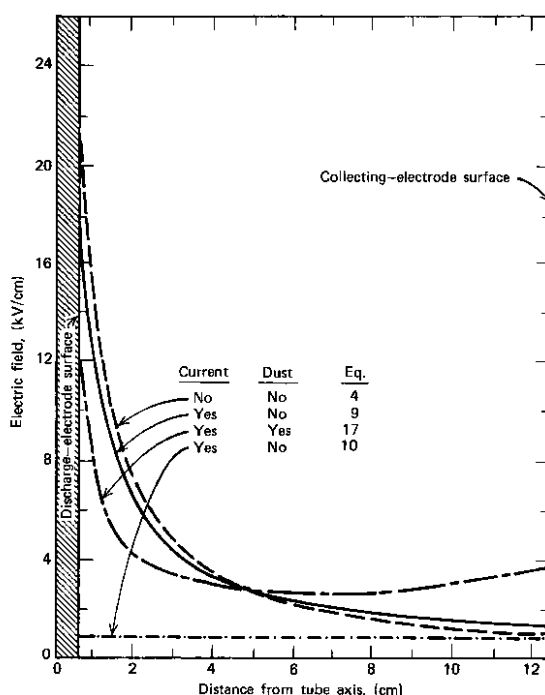
$$I = i \cdot L \quad (2.8)$$

Ke zhodnocení spotřeby zařízení EO je definován vztah pro elektrický příkon rovnicí 2.9.

$$P = I \cdot U \quad (2.9)$$

Pro následující vztahy je potřeba definovat intenzitu elektrického pole, které se vyskytuje mezi nabíjecí a usazovací elektrodou. Z obrázku 5 je zřejmé, že průběh není konstantní po celém průřezu konfigurace. Nejsilnější elektrické pole je v blízkosti nabíjecí elektrody s vysokým napětím. Této oblasti s největší intenzitou elektrického pole se říká ionizační oblast [8] a nabíjení částic je zde významně intenzivnější než ve zbytku, kde je intenzita elektrického pole téměř o řád menší. Jelikož je však ionizační oblast zanedbatelně malá a většina částic je nabíjena v poli s nižší intenzitou elektrického pole, bere se pro zjednodušení výpočtu konstantní průměrná hodnota intenzity elektrického pole E_{av} vypočtená rovnicí 2.10 [17].

$$E_{av} = \frac{U}{R_{us} - r_{nab}} \quad (2.10)$$



Obr. 5 Průběh elektrického pole mezi nabíjecí (vlevo) a usazovací (vpravo) elektrodou.
Převzato z [13].

Částice se nacházejí v elektrickém poli a pro uskutečnění jejich odloučení musí získat náboj. Částice menší 100 nm získávají náboj primárně difúzí a částice s velikostí nad 1 μm získávají náboj primárně polarizací. Částice s velikostí 100 nm až 1 μm jsou částečně nabíjeny difúzí i polarizací [8]. Platí však, že dané velikostní rozmezí je odlučováno nejhůře. Pro výpočtový model byla využita zjednodušená Cochetova rovnice [18], z důvodu přesnějších hodnot pro praktické měření než jiné v literatuře používané metody [17]. Cochetova rovnice uvažuje, že se částice nabije nejen při srážce s ionty, ale i v případě přiblížení na vzdálenost menší, než je velikost střední volné dráhy iontů λ [17]. Vztah pro určení náboje částic Q_p je uveden rovnicí 2.11.

$$Q_p = \left(\left(1 + 2 \cdot \frac{\lambda}{d_p} \right)^2 + \frac{2}{1 + 2 \cdot \frac{\lambda}{d_p}} \cdot \frac{\varepsilon_p - 1}{\varepsilon_p + 2} \right) \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E_{av} \quad (2.11)$$

V této rovnici ε_p je relativní permitivita odlučované částice a její velikost byla stanovena na $\varepsilon_p = 5$ [8]. Hodnota střední volné dráhy iontů odpovídá $\lambda = 68 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ [19]. V reálném případě částice náboj nezíská hned, ale nabývá ho postupně. Zpravidla za čas okolo 0,1 s získá částice 90 % svého náboje [20]. Doba nabíjení částice je ve výpočtu zanedbána.

Stejně, jako je významný vliv velikosti odlučované částice na náboj, tak průměr částice vstupuje do výpočtu pro celkovou odlučovací účinnost. Hodnota průměru částice je upravena korekčním skluzovým faktorem zvaný Cunninghamův faktor C_C , který je dimenzován na teplotu 150 °C a tlak 1 bar [20].

$$C_C = 1 + 1,246 \cdot \frac{2 \cdot \lambda}{d_p} + \frac{2 \cdot \lambda}{d_p} \cdot e^{-0,87 \frac{d_p}{2 \cdot \lambda}} \quad (2.12)$$

Potom, co získala částice náboj, začíná se v elektrostatickém poli pohybovat směrem od nabíjecí elektrody k usazovací. Rychlost, kterou se částice pohybuje, se nazývá driftová rychlost částic w_p a je definována rovnicí 2.12 [20].

$$w_p = \frac{E_{av} \cdot Q_p \cdot C_C}{3 \cdot \pi \cdot \mu_{spal} \cdot d_p} \quad (2.13)$$

V této rovnici μ_{spal} je dynamická viskozita plynného média a vychází z hodnot v tabulce 6. Z mnoha způsobů výpočtu účinnosti byl využit klasický Deutschův vztah rovnicí 2.14 [21]. Výpočet určuje účinnost η_p dle frakční velikosti dané částice. Pro aplikaci výpočtu účinnosti je potřeba zvolit hodnotu napětí, při které pracuje vysokonapěťový zdroj.

$$\eta_p = 1 - e^{\frac{-w_p \cdot S_{us}}{V}} \quad (2.14)$$

V rovnici je V objemový průtok spalin, vycházející z tabulky 7 a S_{us} je plocha usazovací elektrody, kterou určuje rovnice 2.15

$$S_{us} = N \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{us} \cdot L \quad (2.15)$$

Frakční účinnost, která je vztažena na velikost jednotlivé částice, je pro celkové zhodnocení účinnosti EO potřeba přepočítat. K tomu je využita křivka velikostní distribuce uvedená výše na obrázku 3. Pro každý interval, určený distributivní křivkou, byla rozpočítána účinnost daného průměru částic dle rovnice 2.16, kterou tak vzniká celková účinnost η_{EO} , posuzující odlučivost částic ze spalin.

$$\eta_{EO} = \sum F_i \cdot \eta_{p,i} \quad (2.16)$$

Vytvořený výpočtový model zanedbává některé jevy, které se při procesu elektrostatického odlučování běžně vyskytují. Cílem bylo vytvoření modelu, který nejlépe kopíruje experimentální podmínky, ve kterých probíhá měření zařízení. Jedním z důležitých parametrů, který v případě reálných podmínek není uvažován, je vliv usazené vrstvy na usazovací i nabíjecí elektrodě [4].

Pro zhodnocení proudění spalin v kouřovodu byla ve výpočtu zohledněna také rychlost spalin Q_{spal} a Reynoldsovo číslo Re . Vztah rychlosti spalin je uveden v rovnici 2.17.

$$Q_{spal} = \frac{V}{S_R} \quad (2.17)$$

V rovnici S_R je plocha průřezu aktivní části EO a vztah pro její výpočet je v rovnici 2.18.

$$S_R = N \cdot \pi \cdot (R_{us}^2 - r_{nab}^2) \quad (2.18)$$

K charakteru proudění je rovnicí 2.19 uveden vztah pro výpočet Reynoldsova čísla. V celkovém výpočtu není Reynoldsovo číslo zahrnuto do souvisejících vztahů a je tak pouze pro orientační posouzení charakteru proudění.

$$Re = \frac{2 \cdot R_{us} \cdot Q_{spal} \cdot \rho_{spal}}{\mu_{spal}} \quad (2.19)$$

3 Návrh aparatury zařízení

Tato kapitola se zabývá postupem návrhu samotné konfigurace EO podle výpočtového modelu, který je popsán v podkapitole 2.3.

3.1 Omezující požadavky pro návrh konfigurace

Konfigurace EO zahrnuje volbu průměru nabíjecí elektrody, průměru usazovací elektrody, počtu trubek a celkovou délku. Volba byla prováděna na základě dostupných podmínek, které zahrnují elektrické i rozměrové požadavky. Z hlediska elektrických požadavků je východiskem použitý vysokonapěťový zdroj *HCP 1410-20000 (FuG Elektronik GmbH)*, který byl pro potřeby měření zapůjčen z Ústavu fyzikální elektroniky Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity. Je zobrazen na obrázku 6.



Obr. 6 Zdroj vysokého napětí, použitý pro měření EO.

Maximální napětí, které je zdroj schopný vyvinout, je 20 kV a maximální proud 60 mA [22]. Proud ale omezující parametr, vzhledem k vlastnostem korónového výboje, není. Celkový příkon EO je snaha udržet v rozmezí do 20 W, jelikož komerční zdroje vysokého napětí s celkovým příkonem nad 20 W mají výrazně vyšší cenu než v případě nižšího napětí. Nižší cena vysokonapěťového zdroje je pro splnění požadavku minimalizace nákladů zásadní.

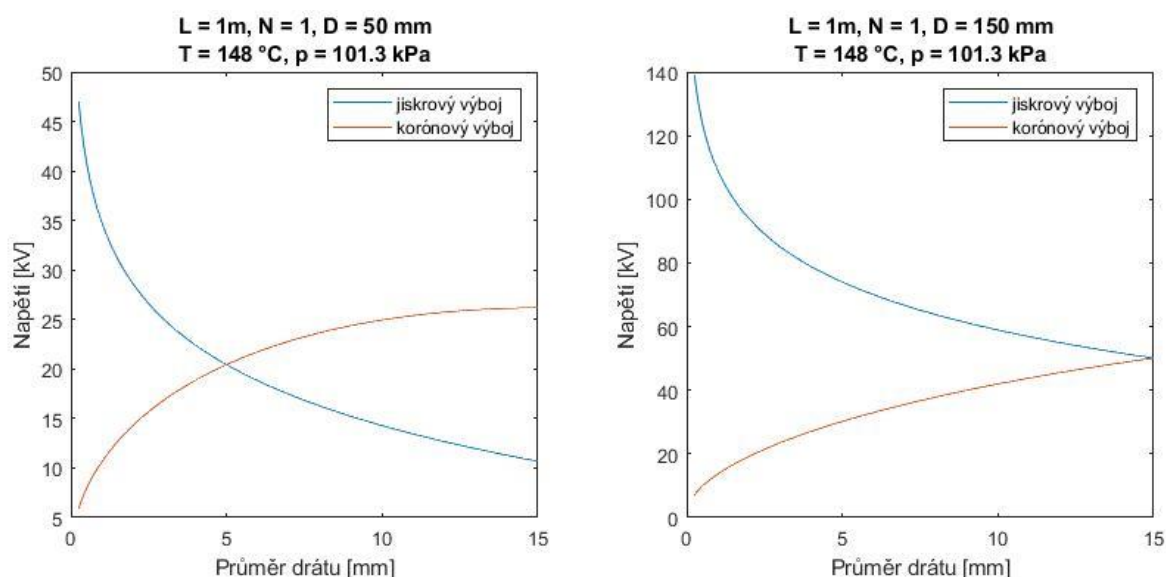
Pro rozměrové požadavky byly určující elektrické vlastnosti korónového výboje a dostupnost nakupovaného materiálu, jelikož nabíjecí i usazovací elektrody nelze sehnat v libovolné velikosti. Průměr a počet trubek bylo potřeba zvolit tak, aby se jejich celkový vepsaný průměr vešel na přírubu, která je spojena s kouřovodem o vnitřním průměru 200 mm a vnějším průměru 230 mm. Celkovou rychlost spalin v úseku odlučovače je potřebné udržet mezi 0,5 a 2,0 m·s⁻¹, dle normy ČSN EN 13384-1, a to pro maximální výkon kotle. Horní hranice tohoto intervalu nemá rychlost překračovat, aby měly částice více času na nabití a na přesun k usazovací elektrodě [8]. Naopak rychlost nižší není vhodná, z důvodu rizika kondenzace spalin, které mají nižší teplotu. Aparatura s kotlem, do které je aplikován EO, má kouřovody s průměrem 160 mm. Rychlost spalin z kotle při jmenovitém výkonu je v tomto kouřovodu 0,67 m·s⁻¹. Počet trubek a jejich průměr je proto volen tak, aby rychlost v konfiguraci EO byla nejlépe stejná nebo nižší. Zvýšení rychlosti právě v aktivní oblasti EO negativně ovlivňuje proudění spalin v kouřovodu a částic ve spalinách obsažených.

Celkovou délkou je uvažována délka aktivního prostoru elektrostatického odlučovače, která je určena délkou nabíjecí a usazovací elektrody. Pro maximální využití prostoru a efektivitu odlučování je volena stejná délka nabíjecí a usazovací elektrody. Celková délka odlučovače byla omezena velikostí místnosti, kde byla umístěna měřicí i odlučovací aparatura s kotlem.

3.2 Konfigurace elektrostatického odlučovače

V této podkapitole jsou voleny konkrétní číselné hodnoty komponent konfigurace, která zahrnuje průměr drátu, průměr a počet trubek a celková délka EO. Konfigurace byla volena na základě grafického vyjádření závislosti na hledaných veličinách. Dále jsou uvedeny grafy závislosti na napětí, hlavní nastavované elektrické veličině. Z napětí je určen celkový příkon EO a závisí na něm také celková účinnost. Pro ilustraci vlivu napětí a konfigurace jsou uvedeny také grafy závislosti příkonu a účinnosti na těchto veličinách. Pro zjednodušení podle dostupnosti materiálu jsou uváděny průměry, narozdíl od poloměrů ve výpočtové části.

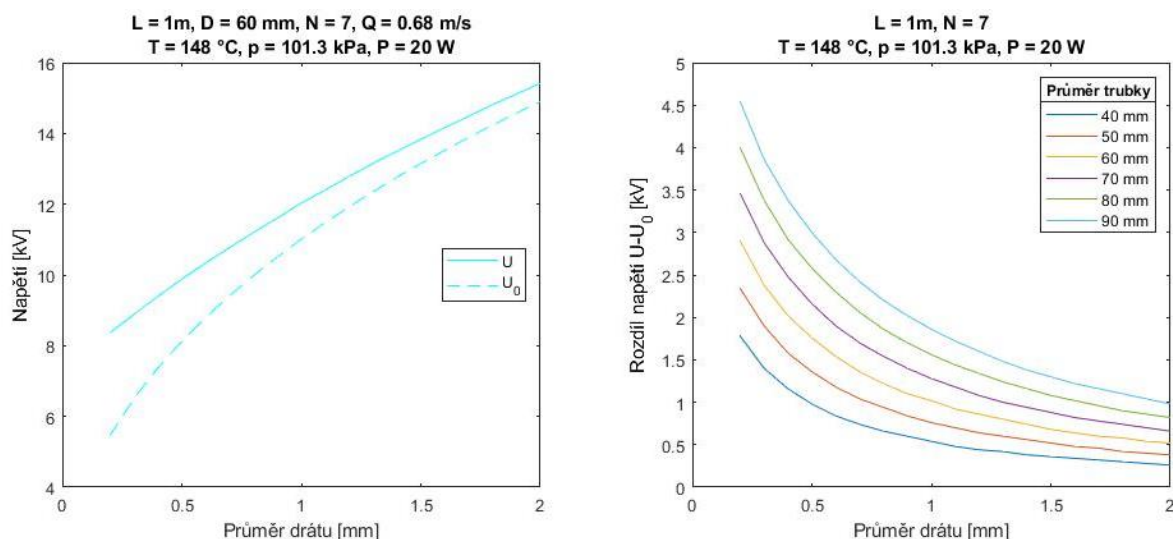
První volenou veličinou je průměr drátu d_0 , který odpovídá dvojnásobku poloměru nabíjecí elektrody r_{nab} . Na základě omezujících křivek pro počáteční kritické napětí korónového výboje a napětí pro vznik jiskrového výboje z výše uvedeného obrázku 4 musí být zvolena taková konfigurace, aby zaručeně probíhal korónový výboj bez rizika přeskóčení jiskry. Na obrázku 7 jsou pro trubky se zvoleným průměrem 50 mm a 150 mm vykresleny grafy závislosti jiskrového a korónového výboje na průměru drátu nabíjecí elektrody. Menší ani větší průměry nedávají z praktického hlediska smysl, byly proto voleny mezní hodnoty. V řádu do nižších jednotek mm je průměr drátu vhodný pro vznik korónového výboje bez rizika jiskrového výboje.



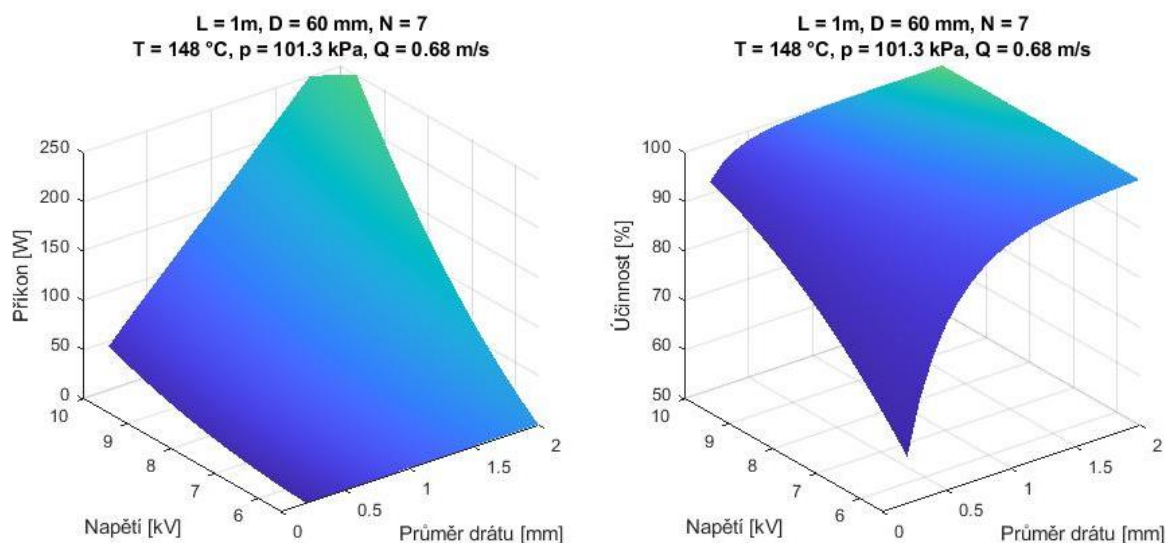
Obr. 7 Graf závislosti počátečního korónového a jiskrového napětí na průměru drátu.

Pro vznik korónového výboje je nejvhodnější co nejzakřivenější povrch, tedy co nejmenší průměr. Na obrázku 8 vlevo je graf závislosti počátečního napětí a požadovaného napětí potřebného pro dosažení ideálního příkonu EO 20 W na průměru drátu. Jelikož se v průběhu odlučování očekává kolísání napětí, je vhodné udržovat dostatečnou rezervu nad počátečním napětím, jelikož s nabývajícím vrstvou částic na usazovací elektrodě hrozí pokles napětí pod počáteční kritické a zhasnutí korony. Vliv průměru drátu na příkon a účinnost v souvislosti s napětím, je uveden na obrázku 9. Větší průměr drátu se negativně podepisuje

na příkonu zařízení, ale je vhodnější pro dosažení vyšší účinnosti. Nezbytné je také zajištění mechanické pevnosti pro upevnění. Průměry obou elektrod dále nemohou mít libovolné rozměry, je třeba dbát na komerční dostupnost drátů.

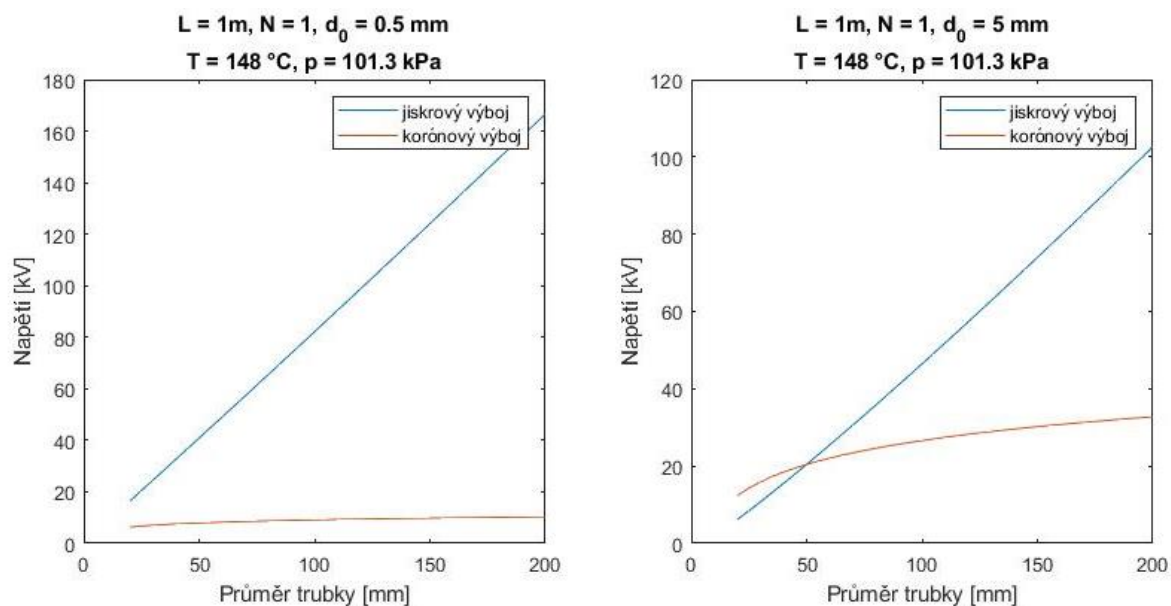


Obr. 8 Graf závislosti napětí na průměru drátu s příkonem EO 20 W. Vlevo: Srovnání aplikovaného napětí s počátečním. Vpravo: Rozdíl aplikovaného a počátečního napětí.



Obr. 9 Graf závislosti příkonu a účinnosti na napětí a průměru drátu.

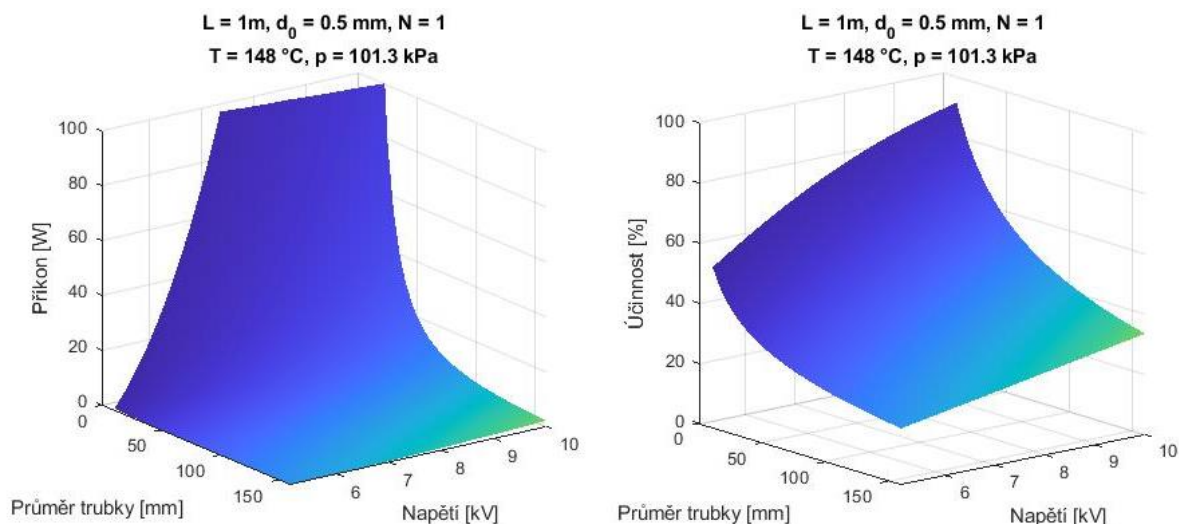
Na obrázku 10 je uveden graf, srovnávající dva řádově odlišné průměry drátu 0,5 mm a 5 mm. V grafu je opět zřejmé, že je vhodnější menší průměr. Na základě těchto poznatků je volen sériově vyráběný drát s průměrem 0,5 mm. Jeho materiálem je AISI 316L, který je běžně využíván při korónovém výboji generátorů ozónu [23], jelikož nerezové oceli SS304-316 mají vynikající odolnost proti ozónu [24].



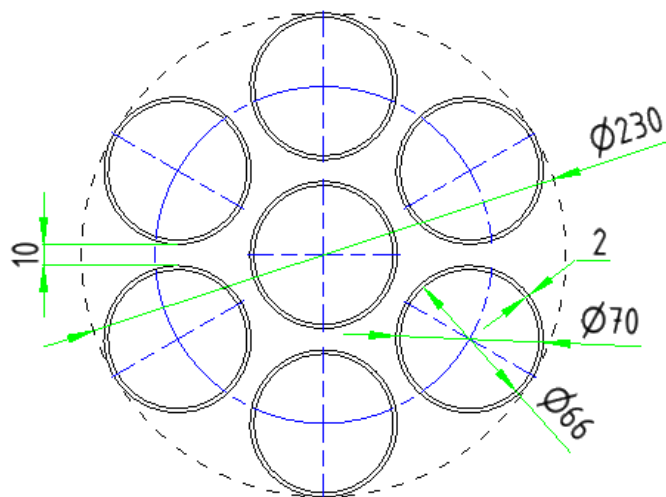
Obr. 10 Graf závislosti napětí pro korónový a jiskrový výboj na průměru trubky.

Další volené veličiny jsou průměr trubky D , který odpovídá dvojnásobku poloměru usazovací elektrody R_{us} , a počet paralelně ukotvených trubek N . Pro průměr trubky byla na základě obrázku 8 vpravo velikost do 50 mm určena jako nevhodná z důvodu rizika rychlého přechodu mezi vznikem korónového a jiskrového výboje. Při takto malém napětovém rozdílu mezi oběma stavy hrozí, že po vzniku korónového výboje a následném odporu prostorového náboje částic by koróna zhasínala [8]. Při rostoucím průměru trubky nad 100 mm již výrazně roste napětí, které je potřebné pro dostatečný elektrický proud koróny, a blíží se maximálnímu napětí, které je schopný poskytnout vysokonapětový zdroj. Stejně závěry jsou zřejmé z obrázku 10, kde je zobrazena závislost napětí na průměru trubky pro dráty s průměrem 0,5 mm a 5 mm. Na obrázku 11 je znázorněn vliv průměru trubky a napětí na příkon zařízení a jeho účinnost. Příliš malý průměr trubky způsobuje velký nárůst příkonu, zatímco v účinnosti se zmenšení průměru projevuje pozitivně.

Pro dosažení konfigurace s opsaným průměrem mezi 200 a 230 mm a zahrnutím výše popsaných požadavků na průměr trubky je k využití plochy průřezu nejvhodnější množství 4 a 7 trubek. Ve volbě byl zahrnut také fakt, že k propojení trubek s kouřovodem bylo třeba trubky navařit na plechové mezikruží. Pro bezproblémové svaření bez kroucení plechu byla potřebná vzdálenost mezi trubkami alespoň 10 mm. Na základě kontroly trubek dle rozměrových řad výrobců byla vybrána trubka s vnějším průměrem 70 mm a tloušťkou 2 mm. Pracovní průměr pro potřeby EO je tak 66 mm. Počet trubek s tímto průměrem je 7. Zvolená konfigurace splňuje požadovanou rychlost spalin a dosahuje $0,56\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Opsaný průměr trubek má hodnotu 230 mm a průřez navržené konfigurace je uveden na obrázku 12. Z důvodu cenové dostupnosti byla volena trubka konstrukční svařovaná z materiálu S235JRH.

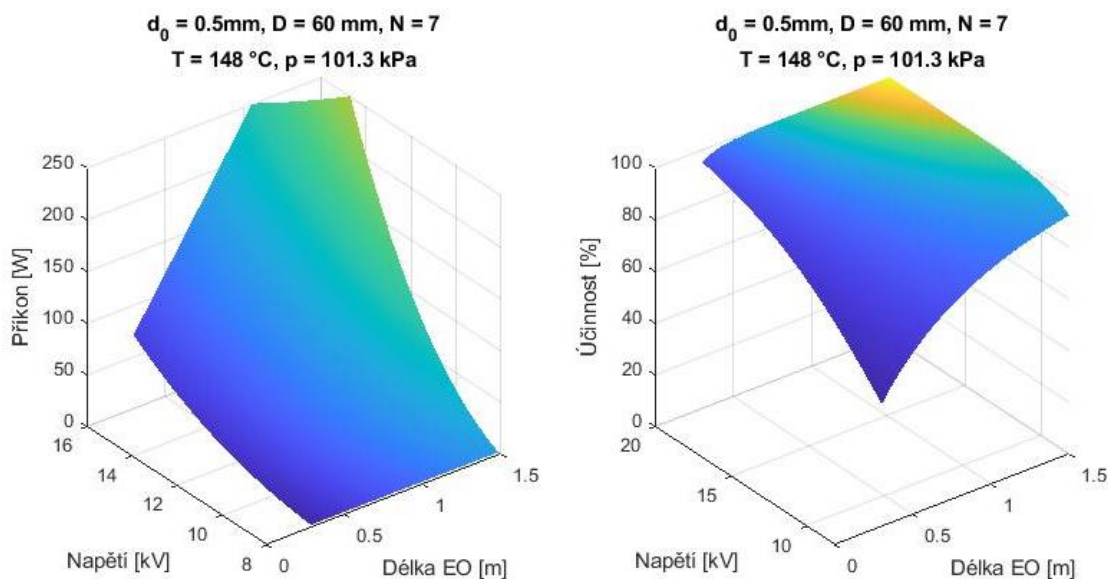


Obr. 11 Graf závislosti příkonu a účinnosti na napětí a průměru trubky.

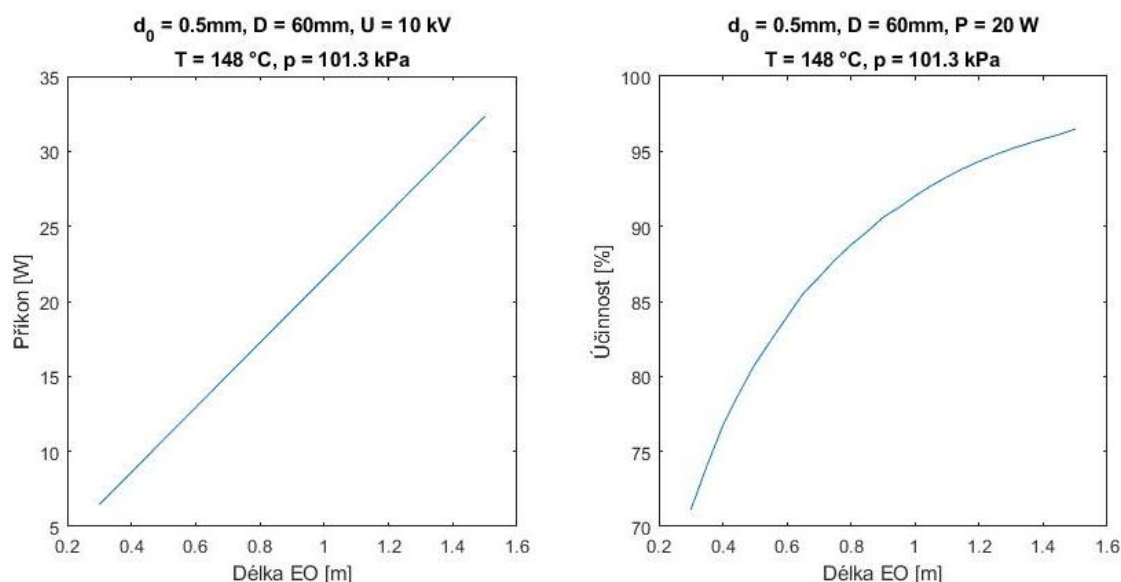


Obr. 12 Navržená konfigurace usazovacích elektrod

Poslední volenou veličinou je délka EO, u které je nezbytné hledat rovnováhu mezi příkonem a účinností. S rostoucí délkou roste účinnost i příkon. Příkon je přímo úměrný délce EO, což je vidět na obrázku 13 společně s vlivem napětí. Na obrázku 14 je stejná závislost pro napětí, které zajišťuje příkon zařízení 20 W. Obecně u EO platí, že pro účinné odloučení je vhodné, aby částice zůstala v prostoru EO alespoň jednu sekundu [8]. Minimální délka je při rychlosti $0,56\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ alespoň 0,56 m. V našich podmínkách byla pro dosažení lepší účinnosti volena délka 1 m, i díky dostatečnému prostoru v místnosti, kde probíhalo měření.



Obr. 13 Graf závislosti příkonu a účinnosti na délce trubek a napětí.



Obr. 14 Graf závislosti příkonu a účinnosti na délce trubek.

Tab. 8 Zvolená konfigurace elektrostatického odlučovače s charakteristickými veličinami

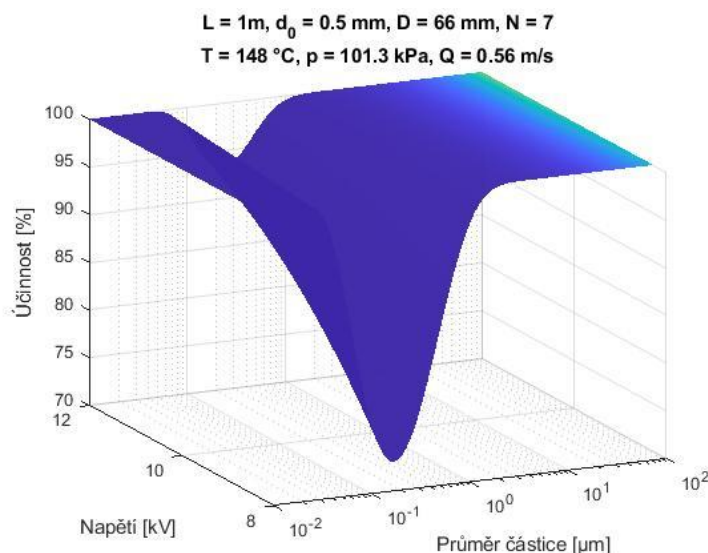
Průměr drátu [mm]	0,5
Průměr trubky [mm]	66
Počet trubek [-]	7
Délka EO [m]	1

V tabulce 8 je uvedena zvolená konfigurace a v tabulce 9 je souhrn všech klíčových parametrů výpočtu pro stav jmenovitého výkonu kotle a 30 % výkonu. V úvahu je bráno, že aplikované napětí je o 2 kV vyšší, než je počáteční napětí, aby tím bylo dosaženo příkonu 20 W. Frakční odlučivost v závislosti na aplikovaném napětí je vyobrazena na obrázku 15. Na obrázku 16 je zobrazena frakční odlučivost pro konkrétní hodnotu aplikovaného napětí.

Z grafů je zřejmé, že nejhůře odlučitelná je frakce s velikostí okolo 250 nm. Tedy pro částice, které nejsou účinně odlučovány ani mechanismem difúze ani polarizace, ale slabou kombinací obojího. Naopak částice s velikostí v řádu jednotek nm a s velikostí nad 1 μm dosahují takřka maximální účinnosti. Na obrázku 17 je vidět, že právě nejhůře odlučitelná frakce částic je ta, kterou kotel produkuje nejvíce, a to se negativně podepisuje na celkové účinnosti. Nedá se však předpokládat, že by uváděná účinnost u frakcí, jejichž odlučivost se blíží 100 %, byla u takto jednoduchého zařízení reálná. A to s ohledem na některé zjednodušující parametry, které výpočtový model obsahuje, a výrobní nepřesnosti, které mohou negativně ovlivnit průběh korónového výboje. Zejména vycentrování drátů do středu trubek je kritické pro správnou funkci zařízení.

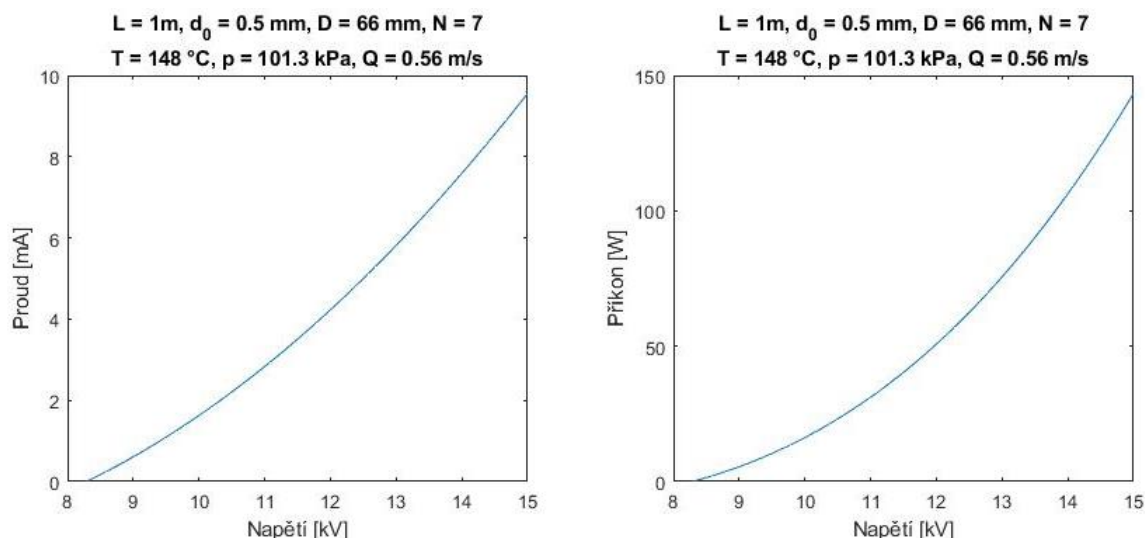
Tab. 9 Přehled veličin při zvolené konfiguraci zařízení s příkonem 20 W.

veličina	jmenovitý výkon	30 % výkon
Teplota spalin [°C]	148	119
Dynamická viskozita spalin [Pa·s]	$2,146 \cdot 10^{-6}$	$2,026 \cdot 10^{-6}$
Mobilita iontů [$\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]	$3,24 \cdot 10^{-4}$	$3,01 \cdot 10^{-4}$
Průtok spalin [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	0,0134	0,0037
Reynoldsovo číslo [-]	1532	480
Rychlost spalin [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	0,560	0,184
Počáteční intenzita el. pole [$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$]	$6,8 \cdot 10^6$	$7,1 \cdot 10^6$
Počáteční napětí [kV]	8,29	8,68
Aplikované napětí [kV]	10,29	10,68
Elektrický proud [mA]	2,0	1,9
Příkon [W]	20,08	20,15
Střední intenzita el. pole [$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$]	$3,14 \cdot 10^5$	$3,26 \cdot 10^5$
Celková účinnost [%]	91,7	99,9

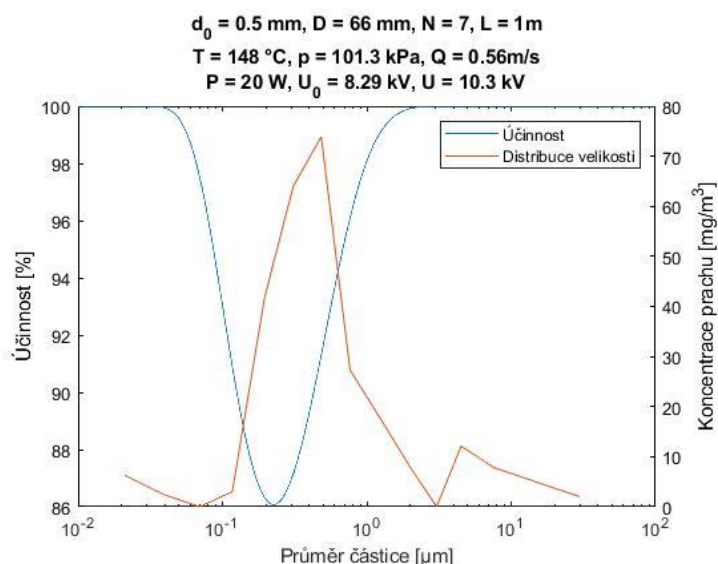


Obr. 15 Graf závislosti frakční účinnosti na napětí.

Na obrázku 16 jsou shrnuty grafy elektrických vlastností zvolené konfigurace. Vlevo je voltampérová charakteristika a vpravo závislost příkonu v obou případech na napětí. Z uvedeného je zřejmý prudký nárůst příkonu s rostoucí hodnotou aplikovaného napětí.



Obr. 16 Grafy: Vlevo voltampérová charakteristika. Vpravo závislost příkonu na napětí.



Obrázek 17 Graf frakční účinnosti a distribuční křivka velikosti částic.

3.3 Konstrukční návrh

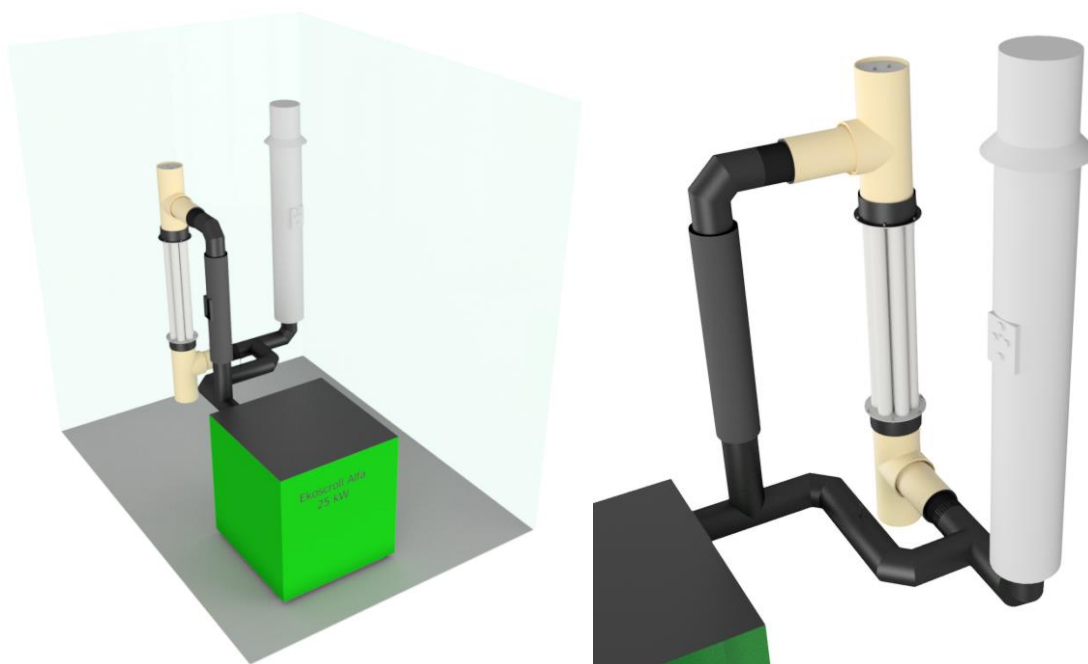
V následující podkapitole je s využitím předchozí volby konfigurace dopracován konstrukční návrh aparatury elektrostatického odlučovače. Hlavními kritérii návrhu z hlediska konstrukce bylo prostorové omezení v testovací místnosti. Fotografie testovací místnosti s kotlem je na obrázku 18. Z důvodu omezené výšky místnosti nebyl tok spalin ve všech částech kouřovodu směrem vzhůru. Dalším klíčovým prvkem bylo zajištění naprosté bezpečnosti z hlediska vysokého napětí, což bylo splněno zejména zařazením elektricky nevodivých komponent. Příloha této práce obsahuje výkresovou dokumentaci vyráběných dílů a sestav, které byly pro zhotovení aparatury použity.



Obr. 18 Fotografie kotle EkoScroll Alfa a okolního prostoru v testovací místnosti.

Vzhledem ke stávajícímu rozměru kouřovodu je volen stejný průměr trubek 160 mm, jako má výstup z kotle. Z důvodu cenové dostupnosti jsou preferovány kouřovody z černé oceli a pro zajištění mechanické pevnosti při manipulaci je volen průměr stěn kouřovodů 2 mm. Znázornění výsledného návrhu aparatury ve 3D modelu je na obrázku 19. Kouřovod byl z vývodu kotle poskládán tak, aby měl tok spalin umožněnou cestu skrze EO nebo bypassem. Proto je brzy za vývodem z kotle zařazen T-kus. Ještě před T-kusem je přímo za kotlem trubka se vstupem pro termočlánky na měření teploty spalin. Větev s elektrostatickým odlučovačem musela být v jednom místě vedena směrem dolů pro získání dostatečné délky odlučovací plochy. Až po provedení měření, které je uvedeno v kapitole 4, byla poupravena kouřová cesta spalin. Aparatura je koncipována tak, že je přívod vysokého napětí v horní části EO. Při měření korónového výboje vyplynulo, že korona vzniká snáz blíže k přívodu VN a dále slábne, což vyplynulo z měření jednoho segmentu konfigurace a zjištění bylo třeba aplikovat na navrženou aparaturu. Proud spalin vstupuje do aktivního prostoru EO také shora, aby získaly částice větší náboj rychleji a měly čas se odloučit na usazovací elektrodu. Do větve s bypassem byla zařazena trubka s klapkou, aby spaliny nemohly pronikat cestou mimo aktivní prostor odlučovače. Odvod spalin vede kvůli měření skrz odběrovou trubku, která zajišťuje ustalovací úsek před i za samotným místem odběru. Tah komína je zajištěn ventilátorem, vzniklé tlakové ztráty na velkém množství spojovacích prvků a kouřové cestě dolů jsou proto zanedbány.

Pro elektrickou izolaci vysokonapěťových součástí od zbytku kouřovodu jsou použity šamotové T-kusy. Jelikož prostorem šamotového T-kusu prochází 7 drátů s rovnoměrnou roztečí, bylo vhodnější volit větší průměr než u zbytku kouřovodu. Byl proto vybrán šamotový T-kus s průměrem 200 mm. Šamotový T-kus má po stranách výrazně delší vývod než v prostřední části. Aby nehrozilo přeskočení výboje na ocelovou část kouřovodu, byla na T-kus nasazená další komínová vložka ze šamotu s průměrem 160 mm. Šamoty jsou utěsněny a spojeny těsnicí šňůrou a oblepeny silikonovou pastou. Spojení komínové vložky s ocelovým kouřovodem je provedeno přes redukci, určenou pro spojení oceli a keramiky těchto kouřovodových dílů.



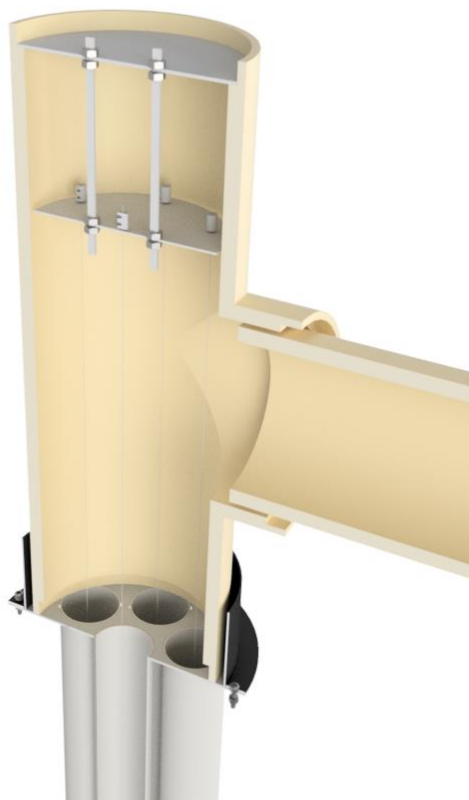
Obr. 19 Navržená aparatura elektrostatického odlučovače v testovací místnosti

Nejkomplikovanější částí celé aparatury je uchycení nabíjecích elektrod. Jedná se o tenký nerezový drát, který je teplotně namáhaný. Teplotní roztažnost nerezového drátu je $16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, což při délce drátu 2 m a změně teploty z 20 °C na 150 °C dělá prodloužení o 4,2 mm. Nemůže tak být vetknutý v kouřovodu, protože by prodloužení způsobilo vychýlení se ze své osy. Při hořícím korónovém výboji hrozí silné kmitání drátu [25]. Správná poloha drátu vůči usazovacím elektrodám je pro rovnoměrný korónový výboj nezbytná. Mechanismus uchycení drátů je na Obr. 20. Jednotlivé dráty jsou protaženy plechem, který se svým průměrem vejde do šamotového T-kusu, a na něm jsou dráty uchyceny vnitřní dutinkou svorkovnice. Tento plech na dráty je pomocí závitových tyčí připevněn k dalšímu plechu, který je nasazený na šamotový T-kus, který má na svém čele osazení. Ve spodní části EO jsou dráty opět uchyceny na plechu, který svou vahou dráty napíná, aby vlivem zvýšení teploty a průběhem korónového napětí nemohly kmitat. Ze spodu šamotového T-kusu je vložena šamotová deska pro utěsnění a ochranu před vysokým napětím.

Trubky, plnící funkci usazovacích elektrod, jsou navařeny na plechy, které jsou šrouby spojeny s protikusem, jak je vidět na Obr. 20. Protikus je nasazený na šamotovém T-kusu a utěsněný těsnicí šňůrou. Vzhledem k tomu, že celková hmotnost sestavy kouřovodu se pohybuje řádově okolo 100 kg, jsou určitá místa pevně zachycena na rámu. Největší část

váhy je přenesena na šamotovou desku, opřenu o část rámu. Celý kouřovod je pro zamezení úniku tepla tepelně zaizolovaný, jediné nezaizolované místo je na přívodu vysokého napětí. Další charakteristikou kouřovodu je jeho mírné vyspádování. Aby nehrozilo, že bude na vnitřní straně kouřovodu kondenzovat voda a zatékat do kotle, je vodorovná část kouřovodu nakloněna směrem od výstupu z kotle.

Při průběhu korónového výboje vzniká v důsledku rozpadu kyslíku na radikály velké množství ozónu. Jelikož je ozón velmi reaktivní, hrozí tak poškození komponentů, které jsou v bezprostřední blízkosti korónového výboje. Kritickým místem jsou zde svary, u kterých je vyžadovaná vysoká kvalita, aby dávka ozónu nezpůsobila korozi svarů a jejich poničení.



Obr. 20 Mechanismus uchycení drátů a napojení trubek na šamotový T-kus.

Kompletní seznam použitých komponentů, které bylo třeba zajistit k sestavení elektrostatického odlučovače, je uveden v tabulce 10. Seznam zahrnuje jak nakupované komponenty, tak ty, které byly dostupné na fakultě a pro potřeby sestavení aparatury využity.

Tab. 10 Seznam komponentů k vytvoření aparatury EO

Sestava	Podsestava	Typ	Prvek	Pr.	Výrobce/Dodavatel	Mn.	Komponenta/Služba
Cesta kouřovodů	Usazovací elektroda	Nákup	Redukce do šamotu		Banador	2	
		Nákup	Trubka 160/250/2			1	
		Nákup	Trubka s klapkou			1	úprava klapky k lepšímu těsnění
		Nákup	T-kus 160/2		Banador	2	křehké
		Nákup	T-kus 200 šamot		Hornbach	2	křehké
		Nákup	Koleno 160/90/2			4	skladem, očistit
		Nákup	Odběrová trubka			1	k odběru a analýze spalín
		Nákup	Komínová vložka 160		Hornbach	2	křehké
		Sestava	Usazovací elektroda			1	svařit trubky s plechy
		Úprava	Trubka usazovací		Feromat	7 m	trubka 70x2
	Návarek	Výroba	Příruba trubková		Aquadem	2	obrys vyřezán, vyvrtat díry
		Sestava	Návarek na šamot			2	svařit plech a rouru
		Úprava	Trubka 250/70/2		Banador	1	z jednoho polotovaru nařezat 2 roury
		Výroba	Plech přírubový		Aquadem	2	obrys vyřezán, vyvrtat díry
Vedení drátů		Výroba	Plech na přívod VN		Aquadem	1	obrys vyřezán, vyvrtat díry
		Výroba	Plech kotvící dráty horní		Aquadem	1	obrys vyřezán, vyvrtat díry
		Výroba	Plech kotvící dráty dolní		Aquadem	1	obrys vyřezán, vyvrtat díry
		Nákup	Nabíjecí elektroda 0,5 mm		Vaprio	2	drát SS316L, 1ks = 9 m
		Nákup	Úchytky drátu		Eim elektro	14	dutinka svorkovnice
Příslušenství		Nákup	Záslepka 160			2	pro případ vedení pouze bypassem
		Nákup	Záslepka 200 šamot			1	šamotová deska na zakrytí T-kusu šamotového
		Nákup	Hliníková páska				
		Nákup	Těsnící šňůra 10 mm		Hornbach	5 m	těsnění mezi trubkou 250/70/2 a T-kusem šamotovým
		Nákup	Těsnící šňůra 6 mm		Hornbach	2 m	těsnění mezi návarkem na šamot a T-kusem šamotovým
		Nákup	Těsnící šňůra 4 mm		Hornbach	4 m	těsnění mezi T-kusem šamotovým a komínovou vložkou
		Nákup	Tepelná izolace				

Elektrická část	Nákup	Kabel žlutozelený zemnicí		Eim elektro	4 m	
	Nákup	Kabel zemnicí		Eim elektro	5 m	k uzemnění do zásuvky
	Nákup	Krimpovací Ni očko M6			5	k uzemnění kouřovodu
	Nákup	Vysokonapěťový kabel			15 m	
	Nákup	Měděná páska		Eim elektro	10 m	k zemnění
Rám	Sestava	Rám držící kouřovod			1	sestavit z nařezaných nosníků
	Nákup	Objímka 160		Ptáček	4	bez těsnící gumy
	Nákup	Objímka 200		Ptáček	3	bez těsnící gumy
Spojovací materiál	Nákup	Nosník 27/18 mm, tl. 1,25 mm		Ptáček	18 m	nařezáno
	Nákup	Šroub M6x12 DIN912 A2			12	
	Nákup	Matice M6 DIN433 A2			12	
	Nákup	Podložka M6 DIN134 A2			24	
	Nákup	Závitová tyč M8x200			2	
	Nákup	Matice M8 DIN433			68	rám, uchycení plechů
	Nákup	Šroub TEX 5,5x25 DIN7504K		Ampeko – tec	42	svrtání kouřovodů k sobě
	Nákup	Závitová tyč M8x500		Ampeko – tec	12	rám
	Nákup	Závitová tyč M8x50		Ptáček	60	rám
	Nákup	Podložka M8 DIN9021		Ptáček	60	rám

Typ položky
Nakupovaný díl
Úprava nakupovaného dílu
Dostupné na FSI
Výroba u dodavatele
Výroba na FSI

4 Měření korónového výboje

4.1 Aparatura k měření korónového výboje

Jelikož je korónový výboj nezbytným fyzikálním jevem k elektrostatickému odlučování, byla pro potřeby testování vytvořena měřicí aparatura ve zvolené konfiguraci dle postupu v kapitole 3.3 ke srovnání s výpočtovým modelem. Pro dostatečnou rezervu před poklesem napětí v průběhu odlučování je vhodné dosáhnout nižších hodnot počátečního kritického napětí. Úbytky napětí mohou nastat vlivem prostorového náboje částic nebo vlivem vrstvy usazených částic na obou elektrodách. V laboratorních podmínkách při teplotě 20 °C a na neznečištěném vzduchu byla měřena voltampérová charakteristika korónového výboje. Použitá trubka má vnější průměr 70 mm s tloušťkou 2 mm, což znamená vnitřní průměr 66 mm. Použitý drát má průměr 0,5 mm a je z nerezové oceli AISI 316L. Návrh aparatury je zobrazen na obrázku 21. Trubka je upevněna dvěma objímkami, které jsou připevněné závitovými tyčemi na ocelovém U-profilu. Po stranách je na profil našroubována tyč z Ertacetalu, na které je seshora připevněn drát, přivádějící elektrické napětí. Tyč z Ertacetalu elektricky odděluje drát se zbytkem aparatury pro zajištění bezpečnosti.



Obr. 21 Návrh aparatury ověřující korónový výboj ve výpočtovém modelu.



Obr. 22 Zapojená aparatura na zdroj vysokého napětí.

4.2 Měření voltampérové charakteristiky

Pro ověření vzniku a průběhu korónového výboje ve zvolené konfiguraci byl na drát připojen zdroj vysokého napětí *HCP 1410-20000 (FuG Elektronik GmbH)*. Pro ověření vzniku výboje bylo přiváděno kladné i záporné napětí za účelem vzniku kladné i záporné korony. Pro změření voltampérové charakteristiky byla hodnota napětí postupně zvyšována až do dosažení vzniku korónového výboje. Samotný vznik korony byl stanoven sluchovým zaznamenáním charakteristického zvuku. Dále bylo napětí v kroku 0,5 kV zvyšováno a byly zaznamenávány hodnoty elektrického proudu. Limitní hodnota pro daný zdroj a současně měření byla 20 kV. Při měření byl pozorován také vznik nežádoucího jiskrového výboje, a to konkrétně u kladného korónového výboje dosažením maximálního napětí 20 kV. Hodnota proudu a příkonu pro 20 kV je těsně před vznikem jiskrového výboje. Při měření záporné korony nebyl zaznamenán vznik jiskrového výboje. Ze součinu napětí a proudu byl dopočítán elektrický příkon. Naměřené a spočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11 a tabulce 12 pro záporný, respektive kladný korónový výboj. Jejich souhrnné srovnání je zobrazeno na obrázku 23.

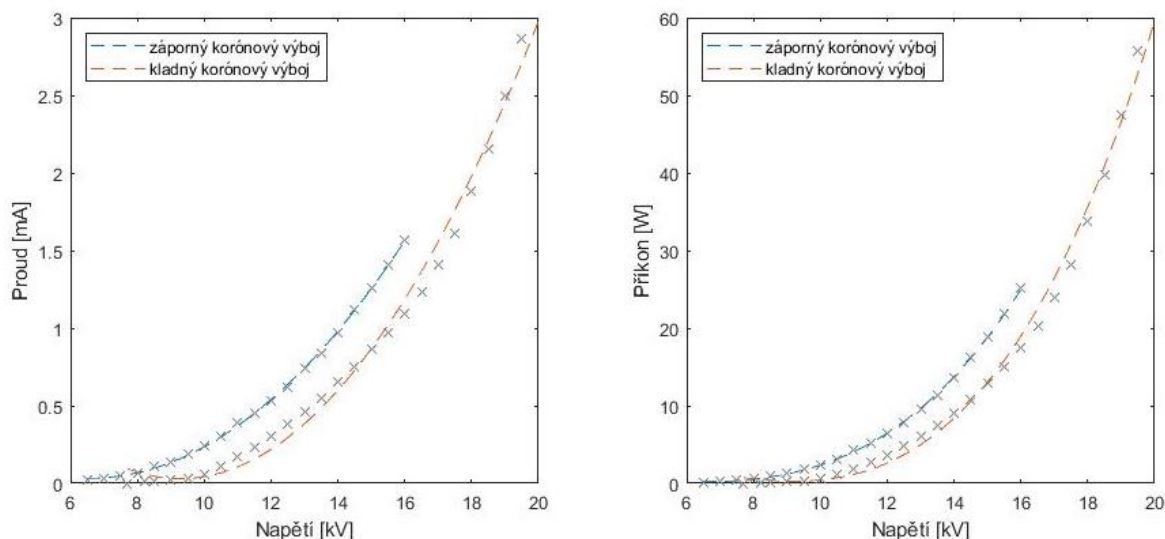
Tab. 11 Měření záporného korónového výboje

U [kV]	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0
I [mA]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,11	0,14	0,19	0,24	0,30	0,39
P [W]	0,13	0,21	0,38	0,56	0,94	1,26	1,81	2,40	3,15	4,29
U [kV]	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0
I [mA]	0,45	0,53	0,62	0,74	0,84	0,97	1,12	1,26	1,41	1,57
P [W]	5,18	6,36	7,75	9,62	11,34	13,58	16,24	18,90	21,86	25,12

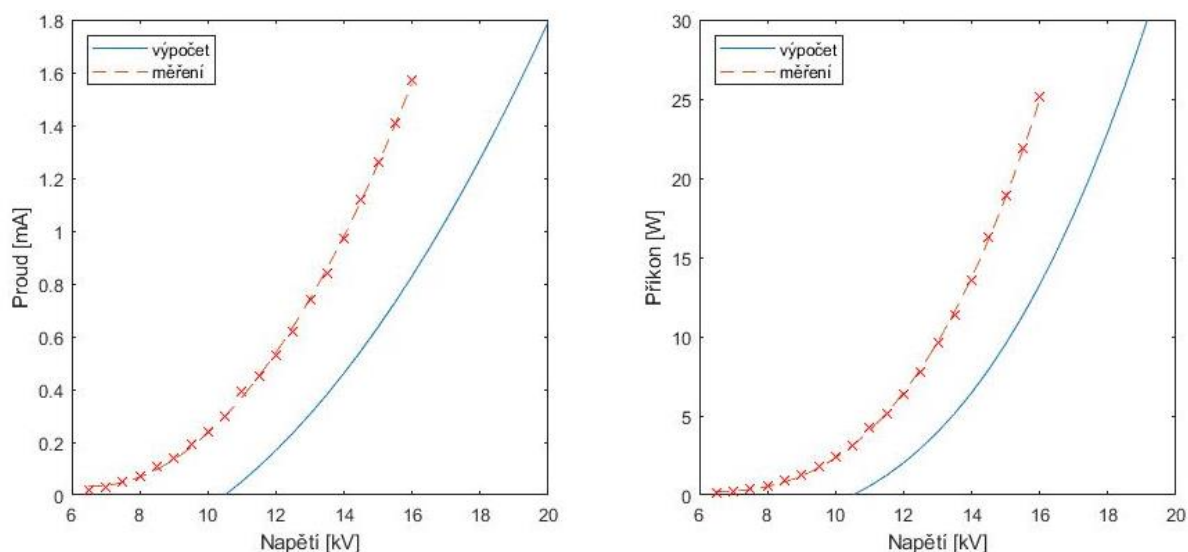
Tab. 12 Měření kladného korónového výboje

U [kV]	7,7	8,2	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0
I [mA]	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,06	0,11	0,17	0,23	0,30
P [W]	0,00	0,08	0,09	0,18	0,29	0,60	1,16	1,87	2,65	3,60
U [kV]	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0
I [mA]	0,38	0,46	0,55	0,65	0,75	0,86	0,97	1,09	1,23	1,41
P [W]	4,75	5,98	7,43	9,10	10,88	12,90	15,04	17,44	20,30	23,97
U [kV]	17,5	18,0	18,5	19,0	19,5	20,0				
I [mA]	1,61	1,88	2,15	2,50	2,86	3,14				
P [W]	28,18	33,84	39,78	47,5	55,77	62,80				

Počáteční kritické napětí bylo u záporného korónového výboje zjištěno při 6,5 kV. Pro kladný korónový výboje je počáteční napětí 7,7 kV. Naměřené hodnoty byly srovnány s výpočtovým modelem, ve kterém je jediná proměnná hodnota teplota. Srovnáván byl pouze záporný korónový výboj kvůli koeficientům k_1 a k_2 , které jsou platné právě pro zápornou koronu. Srovnání průběhů měření s výpočtovým modelem je uvedeno na obrázku 24.



Obr. 23 Grafy měření kladného a záporného korónového výboje. Vlevo: Voltampérová charakteristika. Vpravo: Závislost příkonu na napětí.



Obr. 24 Grafy srovnání měření s výpočtovým modelem. Vlevo: Voltampérová charakteristika. Vpravo: Závislost příkonu na napětí.

4.3 Zhodnocení korónového výboje

Pro ověření vzniku korónového výboje a srovnání s výpočtovým modelem byla vytvořena samostatná aparatura. Pro případ záporné koróny bylo toto počáteční napětí o 1,2 kV nižší než u kladné a je proto pro aplikace v elektrostatickém odlučovači vhodnější. Ze směrnice voltampérové charakteristiky je viditelný strmější růst u kladné koróny oproti záporné. To však mohlo být způsobeno statistickou odchylkou a rozdíl tak není průkazný. To však neplatí u porovnání naměřené koróny s výpočtovým modelem, který je prokazatelně nadhodnocený. Vznik korónového výboje predikoval až při hodnotě 10,5 kV, což je o 4 kV více než ve skutečnosti. Jedním z důvodů rozdílu mohly být empirické koeficienty z rovnice 2.2, které jsou stanoveny pro podmínky spalin, které obsahují velké množství odlučovaných částic. Na vzduchu tak byla cesta ke vzniku koróny snazší. Velkou měrou ovlivňuje vznik korónového výboje také vlhkost vzduchu, která ale nebyla měřena, není ani postihnuta ve výpočtovém modelu, což je pro přesnější model vhodné zjistit. Nepochybným ovlivněním je také samotný povrch nabíjecí elektrody. Zakřivený povrch je původce vzniku korónového výboje a výpočtový model uvažuje drát jako dokonale rovnou válcovou plochu. Ve skutečnosti samotný drát není vyrobený dokonale hladce. Při jeho upnutí byl z důvodu své tuhosti spirálovitě zatočen a vznikly tak ostřejší hrany, iniciující korónu. Dalším důležitým poznatkem z měření je nehomogenita korónového výboje po délce nabíjecí elektrody. V místě, odkud je přiváděno vysoké napětí, vznikala silnější koróna než na druhém konci drátu. V důsledku této nehomogenity byla upravena aparatura, aby v místě silnější koróny byl vstup spalin. Úprava je zahrnuta ve výše uvedeném konstrukčním návrhu.

5 Realizace aparatury a měření

Pro zhodnocení účinnosti a celkové funkčnosti sestaveného elektrostatického odlučovače je potřeba zajistit přístrojovou techniku k měření požadovaných parametrů. K měření je možné využít vybavení, které je dostupné na pracovišti Energetického ústavu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Částice jsou měřeny dle navržených a ověřených způsobů [12] a odebírány z odběrového místa kouřovodu, jak je vidět na obrázku 25. Měření spalín je prováděno z kotle EkoScroll Alfa s výkonem 25 kW, ve kterém jsou spalovány dřevní pelety typu A1. Kotel již splňuje emisní třídu 5 pro spalování biomasy s celkovou produkcí spalín v rozmezí do $40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Tato koncentrace je už sama o sobě nízká a splňuje také přísnější emisní limity pro zařízení Ekodesign. Očekávání pro produkci částic po odloučení jsou tedy velmi nízké koncentrace.

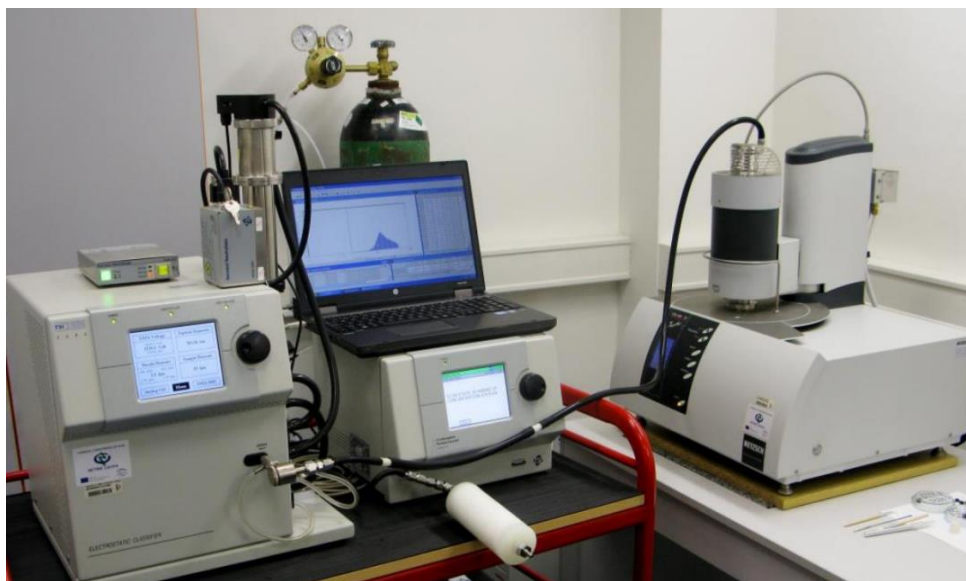


Obr. 25 Odběrové místo z kouřovodu. [12]

K realizaci aparatury byl elektrostatický odlučovač sestaven a poznatky ze sestavené aparatury byly zaznamenány a diskutovány. Dále v této kapitole jsou zhodnoceny veškeré poznatky, které vyplynuly z měření na aparatuře elektrostatického odlučovače.

5.1 Přístrojové vybavení

Níže je popsán seznam přístrojů, které jsou využitelné k měření částic a zhodnocení účinnosti elektrostatického odlučovače. Hlavním přístrojem k měření velikosti a koncentrace částic je SMPS (*Scanning Mobility Particle Sizer*) od firmy TSI, které zahrnuje impaktor na odloučení částic PM_{10} a větších, neutralizátor, tedy zařízení DMA a CPC. Přístroj SMPS je uveden na obrázku 26.



Obr. 26 Sestava zařízení SMPS na stolku vlevo. Převzato z [12].

DMA (*Differential Mobility Analyzer*) je zařízení, které nasává aerosol a nosný plyn, vypouští monodisperzní aerosol. Pomocí DMA se získává distribuční křivka velikostí částic. Na pracovišti se nachází model 3080L s negativní polaritou elektrostatického klasifikátoru.

CPC (*Condensation Particle Counter*) je kondenzační čítač, který zaznamenává počet monodisperzních částic. Použité zařízení CPC je model 3775.

Termoředič vzduchu s rotačním diskem je zařízení, které do spalin přimíchává vzduch, který neobsahuje částice. Jelikož hrozí brzké zahlcení přístrojů příliš velkým množstvím částic, jsou spaliny pro přesnější měření ředěny vzduchem.

Impaktor *Dekati HT-DLPI+* je zařízení, měřící velikostní distribuci částic pro 14 frakcí s velikostí mezi 16 nm a 10 μm [26]. Vyhodnocení probíhá gravimetrickou analýzou. Zařízení je vyhříváno, což zamezuje kondenzaci spalin. Kaskádový impaktor je uveden na obrázku 27.



Obr. 27 Kaskádový impaktor Dekati HT-DLPI+. [26]

5.2 Stav sestavené aparatury

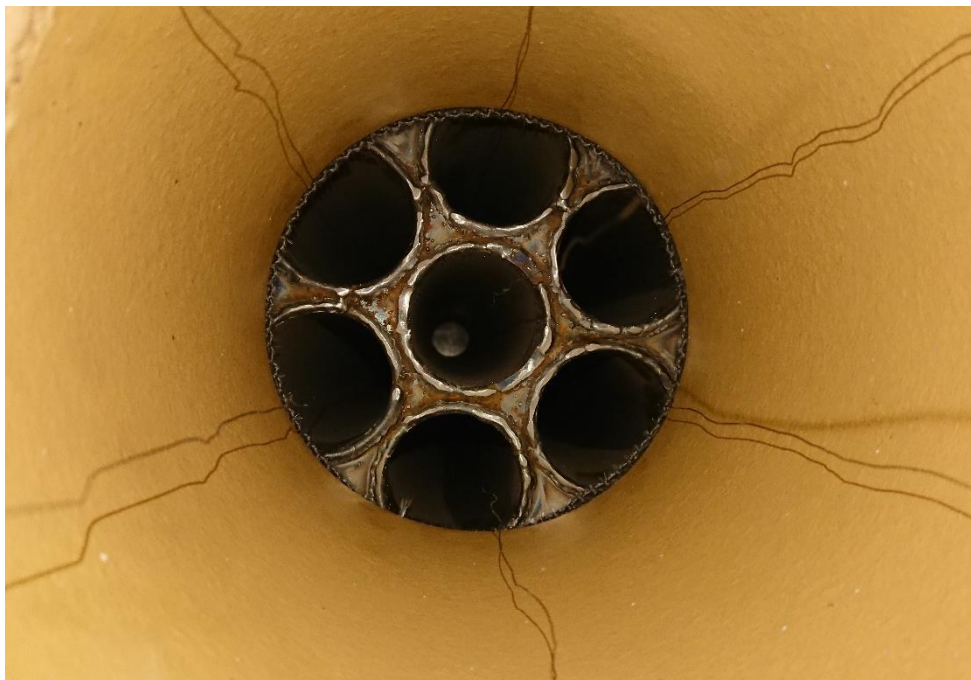
Výroba dílů, použitých k sestavení aparatury elektrostatického odlučovače, probíhala částečně u některých dodavatelů a částečně na pracovištích Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Výkresová dokumentace vyráběných dílů a sestav je součástí přílohy. Plechy k uchycení nabíjecích elektrod a pro usazovací elektrodu byly vyřezány vodním paprskem a díry v nich byly následně ručně vyvrtány na stolní vrtačce. Roura 250/100/2 a trubky usazovací byly nařezány na příslušné délky. Usazovací elektroda byla vytvořena svařením trubek na přírubu po celém obvodu trubek, aby skrze svary nemohly pronikat spaliny. Jelikož mají svary v některých místech ostré hrany, jedná se o kritické místo, kde vzniká korónový výboj snadněji než na hladkém povrchu trubky. Očekává se zde proto silnější hoření výboje a silnější nabíjení částic na úkor délky. Na obrázku 28 je vidět místo svaru trubek s plechem. Uvnitř trubky jsou v důsledku svařování body, které způsobí nižší hodnotu počátečního kritického napětí pro vznik korónového výboje.



Obr. 28 Místo svaru na usazovací elektrodě.

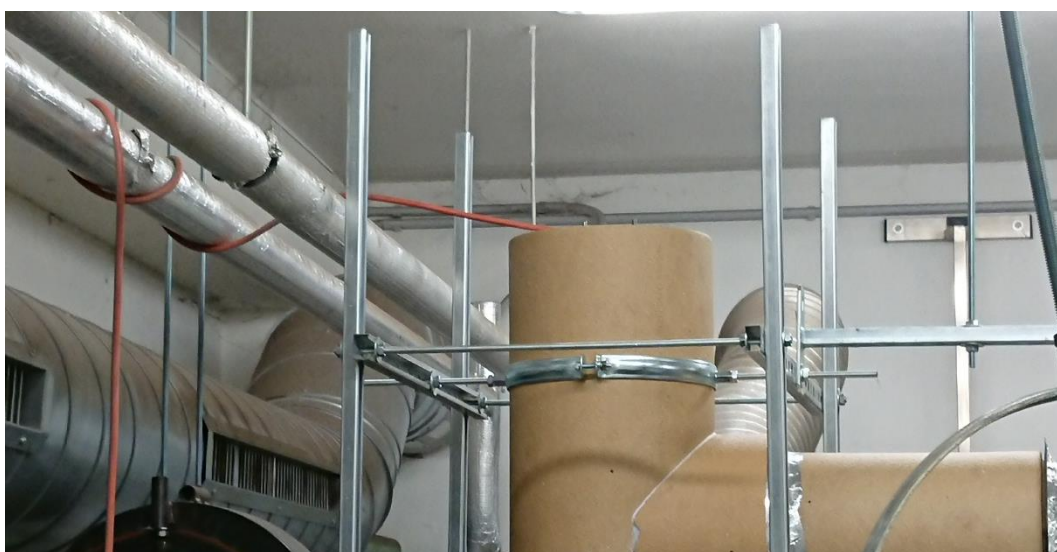
Při sestavování jednotlivých částí kouřovodu a výrobních dílů bylo nejkritičtější místo vedení drátů usazovací elektrodou. Pro správné hoření korónového výboje, nabíjení částic a následné usazování musí být ideálně nabíjecí drát každého segmentu uprostřed trubky. Z důvodu zohýbání drátu při upevňování úchytek nebylo možné přesného vycentrování docílit. Jako nedostatečná se ukázala také hmotnost plechu, kotvícího dráty v dolní části EO. Hmotnost plechu je podle výkresu 0,67 kg, což se ukázalo pro efektivní natažení všech sedmi drátů jako nedostatečné. Vedení drátů je zobrazeno na obrázku 29. Další nepřesnost při sestavování vznikla upevňováním návarku na šamotový T-kus. Vnější průměr šamotového T-kusu byl obmotán těsnící šňůrou s průměrem 10 mm a po nasazení návarku byl zalepen červeným

silikonem. Tímto způsobem nemohla být dodržena tolerance souososti, což přispělo k vyosení drátů mimo osu usazovacích elektrod.



Obr. 29 Uchycené nabíjecí elektrody.

Pro uchycení celé aparatury kouřovodů a trubek byl sestaven z nosníků rám, který přes objímky drží jednotlivé části kouřovodu. Pro zamezení průniku spalin netěsnostmi a nasávání falešného vzduchu byly spoje částí kouřovodu zalepeny hliníkovou páskou. Ve třech místech byla na části kouřovodu připevněná měděná páska, na kterou byly připevněny zemnicí kabely. Vysokonapěťový kabel byl přiveden na horní plech, který je položen na šamotovém T-kusu, jak je vidět na obrázku 30. K plechu je připevněn přes očko, chycené maticí na závitové tyči. Výsledná sestavená aparatura bez zapojených měřicích přístrojů je na obrázku 31.



Obr. 30 Přívod VN kabelu.



Obr. 31 Sestavená aparatura EO.

Pro spuštění kotle bylo dále nezbytné na výstup z kouřovodu napojit odvod, který odsává spaliny ventilátorem. Na odběrové příruby byl napojen přístroj *Horiba Gas Analyzer VA 5000*, který v reálném čase měří zastoupení kyslíku, oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a souhrnně oxidy dusíku, což určuje kvalitu spalovacího procesu. Dále byla měřena teplota spalin u výstupu z kouřovodu ke zjištění, jak moc se po délce kouřovodu spaliny vychlazují. Odvod spalin ventilátorem a zapojení měřicích přístrojů v odběrové trubce je zobrazeno na obrázku 32.



Obr. 32 Zasazení odběrové trubky do odvodu do komína.

5.3 Měření aparatury za provozu kotle

V sestavené aparatuře byly nejprve vysokonapětovým zdrojem měřeny elektrické charakteristiky na vzduchu bez spuštění kotle. Z měření uvedeného v kapitole 4 je předpokládán vznik korónového výboje při hodnotě napětí 6,5 kV. Větší množství trubek nemá vliv na počáteční hodnotu napětí pro vznik korónového výboje, hodnota by tak měla odpovídat té z měření jednoho segmentu. Ve skutečnosti však korónový výboj začal vznikat již při hodnotě 3,0 kV, jak je uvedeno v tabulce 13. Hlavními důvody jsou bezpochyby nepřesné vyosení drátů v trubkách, snížená kvalita svaru s ostrými hranami a body, které se vytvořily na vnitřním povrchu trubek při svařování. Dále mělo velký vliv zkroucení drátů, které tak na sobě měly ostřejší hrany pro vznik korónového výboje. Nedostatečné natažení drátů způsobovalo kmitání, které usnadnilo vznik jiskrového výboje při napětí 8,5 kV, což je výrazný skok oproti měření na jednom segmentu, kde nevznikl ani při 20 kV.

Tab. 13 Měření výboje elektrostatického odlučovače bez procházejících spalín.

Podmínky vzniku výboje	Korónový výboj	Jiskrový výboj
U [kV]	3,0	8,5
I [mA]	0,05	1,3

Finální měření bylo za provozu kotle, který se nejprve vyhrál do ustáleného stavu. Ještě před spuštěním elektrostatického odlučovače byla ustálená teplota spalín na výstupu okolo 60

°C. Jedním z hlavních důvodů byla absence tepelné izolace na celé kouřové cestě. Kotel, na kterém probíhalo měření, má vysokou účinnost a na poměry lokálních topenišť z nich odchází spaliny s velmi nízkou teplotou. V některých místech bylo zřejmé, že v kouřovodu začínají kondenzovat spaliny, což je vidět také na obrázku 33. Hrozící přítomnost vody na povrchu usazovací elektrody nebyla v návrhu uvažována. Po následném zapnutí vysokonapěťového zdroje nevznikl korónový výboj, drát a trubky byly zřejmě ve zkratu. Aparatura elektrostatického odlučovače tak nebyla schopna odlučovat částice. Pro zprovoznění aparatury je potřeba provést nezbytné úpravy.



Obr. 33 Kondenzace spalin v kouřové cestě.

5.4 Návrh konstrukčních úprav

Pro zprovoznění elektrostatického odlučovače a jeho zpřesnění je potřeba provést konstrukční úpravy. Pro dosažení co nejvíce homogenního korónového výboje je potřeba zajistit vycentrování drátů do středu trubek. Je proto potřeba zvětšit hmotnost dolního plechu k natažení drátů a minimalizování kmitání při hořícím korónovém výboji. Z hodnoty napětí 6,5 kV, která je dostačující pro vznik korónového výboje v jednom segmentu, je zřejmé, že je možné použít drát s větším průměrem. Vhodný průměr drátu má velikost 1 mm. Je tím zajištěna vyšší tuhost drátu a menší kroucení za předpokladu opatrné manipulace při sestavování vedení drátů. Na dráty je vhodné také zavěsit keramické tyčinky dovnitř trubek k vycentrování drátu. Aby nedocházelo k elektrickému spojení usazovací a nabíjecí elektrody z důvodu zkondenzovaných spalin na vnitřním povrchu šamotového T-kusu, je potřeba opatřit plech povrchovou úpravou proti zamezení elektrické vodivosti. Povrchovou úpravou může být například nanesení dostatečné tloušťky nevodivé barvy. Aby nevznikal korónový výboj primárně na malém prostoru, je potřeba zahladit svary a body, které vznikly po svaření na povrchu trubek.

Pro měření bez kondenzující vody je vhodnější použít kotel s menší účinností a vyšší teplotou spalin, které se nestihnou v kouřovodu schladit pod teplotu varu vody. Dále je vhodné celou kouřovou cestu tepelně zaizolovat, v místě elektrostatického odlučovače nejlépe bez vnější pokrývky hliníkovou páskou, která vede elektrický proud.

5.5 Návrh dalšího měření a úprav výpočtového modelu

K přesnějšímu zjištění konstrukčních úprav, které je potřeba pro zprovoznění provést, je vhodné zajistit některá měření. Jelikož se předpokládá elektrická vodivost šamotu, na kterém se drží voda při kondenzaci, je potřeba tuto skutečnost ověřit měřením. V případě funkčnosti aparatury elektrostatického odlučovače je nezbytné provést měření s přístrojovou technikou, popsanou v kapitole 4. Tímto měřením se zjistí distribuční křivka, kterou je potřeba pro daný kotel uvést jako vstupní veličinu. Pro ověření výpočtového modelu je také vhodné zahrnout větší množství konfigurací změnou počtu a průměru trubek a drátu, včetně jejich celkové délky. Je potřeba se také zaměřit na proměnnost aplikovaného napětí a elektrického příkonu a jejich skutečný vliv na účinnost EO. Ve výpočtovém modelu je potřeba se také zaměřit na proměnlivou teplotu vlivem zchlazení v kouřovodu a také vlhkost, která má na vznik korónového výboje vliv, ale není postihnutá v základním vzorci pro výpočet počátečního kritického napětí pro korónový výboj. Další faktor, který zpřesní výpočtový model, a to v reálných podmínkách, je vrstva částic, usazených na povrchu trubek. Do reálných podmínek je vhodné navrhnout elektrostatický odlučovač, v němž stoupají spaliny vzhůru a který neobsahuje bypass, nezbytný pro experimentální aparaturu.

Závěr

Spalovací jednotky vypouští při svém provozu spaliny s velkým množstvím tuhých znečišťujících látek. Tyto látky nabývají velmi malých rozměrů a mohou pronikat hluboko do lidského organismu. Jednou z nejpoužívanějších metod zachytávání těchto částic je elektrostatické odlučování, které je nedílnou součástí každého velkého energetického celku, jako jsou elektrárny a teplárny, spalující tuhá paliva. U lokálních topenišť nejsou elektrostatické odlučovače v praxi využívány. Vyvinutá komerční zařízení obvykle převyšují cenu spalovací jednotky, což je pro zákazníka nevhodné. V této práci bylo navrženo experimentální zařízení elektrostatického odlučovače, které je použitými komponentami cenově dostupnější.

Pro návrh elektrostatického odlučovače byl nejprve vytvořen výpočtový model v prostředí programu MATLAB, který postihuje základní fyzikální principy, nastávající při elektrostatickém odlučování. Výstupem výpočtového modelu jsou grafické závislosti na provozních parametrech a rozměrových veličinách, ze kterých vyplynula navržená konfigurace elektrostatického odlučovače. Postupně bylo vytvořeno několik konstrukčních návrhů. V předchozích variantách se počítalo s konfigurací jedné trubky o průměru 160 mm a následně variantě 4 trubek. Až finální konfigurace obsahuje 7 trubek s vnitřním průměrem 66 mm, ve kterých je drát s průměrem 0,5 mm. Celková délka aktivní části elektrostatického odlučovače je 1 m. Z navržené konfigurace byl vytvořen konstrukční návrh celé aparatury k měření v podmínkách spuštěného kotle. V několika předchozích variantách byly uvažovány návrhy, které uvažovaly horizontální tok spalin nebo tok spalin elektrostatickým odlučovačem vzhůru. Konstrukční návrh zahrnuje výkresovou dokumentaci a 3D model sestavy, vytvořené v programu Autodesk Inventor. Konfigurace elektrostatického odlučovače byla ověřena měřením jedné trubky bez spalin při pokojové teplotě. Pro záporný potenciál vznikl korónový výboj při napětí 6,5 kV. Ani při aplikaci maximálního možného napětí 20 kV nevznikl nežádoucí jiskrový výboj. Na základě poznatků z měření korónového výboje byla poslední iterací návrhu upravena aparatura obrácením toku spalin skrze aktivní část s korónovým výbojem.

Po zahrnutí úprav byla sestavena aparatura pro měření v kotli EkoScroll Alfa 25 kW. Před spuštěním kotle byl na elektrostatickém odlučovači otestován korónový výboj. Vznikat začal korónový výboj při napětí 3 kV, jiskrový výboj se objevil při 8,5 kV. Odchylka oproti měření na jednom segmentu byla způsobena zejména nepřesným vycentrováním drátů v trubkách, špatným povrchem trubek, které v místě svaru obsahovaly ostré hrany a body, a kroucením drátů, které byly nedostatečně zatíženy. Při měření napětí na spuštěném kotli s ustáleným spalováním bylo zjištěno, že korónový výboj vůbec nevzniká. Z měření teploty spalin, které měly při výstupu z kouřovodu 60 °C, a vzniku kapek na kouřové cestě byla potvrzena kondenzace spalin. Je předpoklad, že voda nasáklá v izolačních materiálech elektricky spojila nabíjecí a usazovací elektrodu. Pro řešení tohoto předpokladu byly navrženy způsoby, jak elektrickému spojení zamezit. Patří mezi ně povrchová úprava plechů, které kotví dráty, aby nebyly elektricky vodivé. Pro vymezení drátů do středu trubek bylo navrženo použití centrovacích dílů. Aplikací těchto úprav je aparatura připravena na odlučování i pro případ kondenzace spalin v kouřovodu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] BRZEZINA, J. *Ve městě nedýchatelno, na vesnici čistý vzduch - opravdu?* [online]. In: . [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2019/04/16/ve-meste-nedychatelno-na-vesnici-cisty-vzduch-opravdu/>
- [2] ANDREOVSKÝ, Jan, Vladimíra HENELOVÁ, ed. *Příručka ochrany kvality ovzduší* [online]. Vyd. 1. Praha: Sdružení společností IREAS centrum, 2013 [cit. 2022-05-19]. ISBN 978-80-86832-77-7. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/prirucka_ochrany_kvality_ovzdusi/\\$FILE/000-prirucka_OPLZZ_komplet-20140408.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/prirucka_ochrany_kvality_ovzdusi/$FILE/000-prirucka_OPLZZ_komplet-20140408.pdf)
- [3] Odlučovač popílku. In: *Svět energie* [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/uhelne-elektrarny/uhelna-elektrarna-podrobne/odlucovac-popilku/fyzikalni-principy>
- [4] ŠTORCH, Otakar. *Průmyslová odlučovací zařízení*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1957, 322 s.
- [5] HUANG, K. Spark and its effect on electrostatic precipitator. In: *ICESP X*. Australia, 2006, Paper 5B1.
- [6] Fyzikální principy odlučovače popílku. In: *Svět energie* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/uhelne-elektrarny/uhelna-elektrarna-podrobne/odlucovac-popilku/fyzikalni-principy>
- [7] EINSTEIN, A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik* [online]. Leipzig: WILEY-VCH Verlag, 1905, 322(8), 549-560 [cit. 2022-05-19]. ISSN 0003-3804. Dostupné z: doi:10.1002/andp.19053220806
- [8] BÖHM, Jaroslav. *Elektrické odlučovače*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 327 s.
- [9] KANTOR, Tomáš. *Elektrostatický odlučovač pro domovní spalovací zařízení spalující dřevní paliva*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2020.
- [10] LIČKA, Z. *Dřevní peleta II spalování v malých zdrojích tepla*. 1. vyd. Krnov: LING Vydavatelství s.r.o., 2011. ISBN 978-80-904914-1-0.
- [11] Technické parametry kotlů. In: *EkoScroll* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.ekoscroll.cz/data/files_content_category/63/Automatický%20kotel%20ALFA%20-%20technická%20data.pdf
- [12] POLÁČIK, Ján. *Vliv provozních parametrů spalovacího procesu na koncentraci jemných částic ve spalínách biomasových kotlů*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2020.
- [13] MOORE, A. D. *Electrostatics and its applications*. 1. New York: John Wiley and Sons,

-] 1973. ISBN 0-471-61450-5.
- [14 WHITE, Harry J. *Industrial Electrostatic Precipitation*. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1963.
- [15 TOWNSEND, J. S. The Conductivity produced in Gases by the Motion of Negatively-charged Ions. *Nature*. 1900, **62**(1606), 340-341. Dostupné z: doi:10.1038/062340b0
- [16 BÖHM, Jaroslav. *Elektrické odlučování a odlučovače*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1959.
-] [17 MOLCHANOV, Oleksandr, Kamil KRPEC a Jiří HORÁK. Electrostatic precipitation as a method to control the emissions of particulate matter from small-scale combustion units. *Journal of cleaner production* [online]. Elsevier Ltd, 2020, **246** [cit. 2021-05-04]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.119022
- [18 COCHET, R. Lois de charge des fines particules (submicroniques). Etudes théoriques - contrôles récents. Spectre de particules. *La physique des forces électrostatiques et leurs applications*. No. 102. Paris: CNRS, 1961, s. 331-338.
- [19 JENNINGS, S.G. The mean free path in air. *Journal of aerosol science* [online]. Elsevier Ltd, 1988, **19**(2), 159-166 [cit. 2022-04-03]. ISSN 0021-8502. Dostupné z: doi:10.1016/0021-8502(88)90219-4
- [20 PARKER, Ken. *Applied Electrostatic precipitation*. První. Madras, India: Chapman & Hall, 1997. ISBN 978-94-010-7193-2.
- [21 DEUTSCH, Walther. Bewegung und Ladung der Elektrizitätsträger im Zylinderkondensator. *Annalen der Physik* [online]. Leipzig: WILEY-VCH Verlag, 1922, **373**(12), 335-344 [cit. 2022-04-03]. ISSN 0003-3804. Dostupné z: doi:10.1002/andp.19223731203
- [22 *High voltage power supplies: HCP datasheet* [online]. In: . [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://www.fug-elektronik.de/wp-content/uploads/download/en/PRO/HCP_data_sheet.pdf
- [23 UNČOVSKÝ, Ondřej. Všechno co jste kdy chtěli vědět o ozonu a UV. In: *ASIO - čištění a úprava vod* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.asio.cz/cz/161.vsechno-co-jste-kdy-chteli-vedet-o-ozonu-a-uv-ale-bali-jste-se-septat>
- [24 Jak funguje generátor ozónu. In: *Ozonové generátory* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.ozonove-generatory.cz/Jak-funguje-generator-ozonu/>
- [25 KAWASAKI, Motoyuki a Takayoshi ADACHI. Mechanism and preventive method of self-excited vibration of corona wire in an electrostatic precipitator. *Journal of electrostatics* [online]. AMSTERDAM: Elsevier B.V, 1996, **36**(3), 235-252 [cit. 2022-05-19]. ISSN 0304-3886. Dostupné z: doi:10.1016/0304-3886(95)00047-X

[26 HT-DLPI+. In: *Dekati* [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z:
] <https://www.dekati.com/products/ht-dlpi/>

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Veličina
b_0	$[m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}]$	konstanta pohyblivosti iontů
b_i	$[m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}]$	pohyblivost iontů
C_C	[-]	Cunninghamův faktor
D	[m]	průměr trubky = $2 \cdot R_{us}$
d_0	[m]	průměr drátu = $2 \cdot r_{nab}$
d_p	[m]	průměr částice
E_0	$[V \cdot m^{-1}]$	počáteční intenzita elektrického pole
E_{av}	$[V \cdot m^{-1}]$	intenzita elektrického pole
F_i	[-]	hmotnostní podíl částic frakce i
G	$[F \cdot m^{-3}]$	koeficient konfigurace
I	[A]	elektrický proud
i	$[A \cdot m^{-1}]$	lineární proudová hustota
k_1	$[V \cdot m^{-1}]$	empirická konstanta
k_2	$[m^{0,5}]$	empirická konstanta
L	[m]	délka EO
N	[-]	počet trubek
p	[Pa]	tlak spalin
P	[W]	elektrický příkon EO
Q_p	[C]	náboj částice
Q_{spal}	$[m \cdot s^{-1}]$	rychlost spalin
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
r_{nab}	[m]	poloměr nabíjecí elektrody
R_{us}	[m]	poloměr usazovací elektrody
S_R	$[m^2]$	plocha průřezu EO
S_{us}	$[m^2]$	plocha usazovací elektrody
T	[K]	termodynamická teplota spalin
U	[V]	napětí na nabíjecí elektrodě
U_0	[V]	počáteční kritické napětí
U_S	[V]	kritické napětí pro jiskrový výboj
V	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	objemový průtok spalin
w_p	$[m \cdot s^{-1}]$	driftová rychlost částice
δ	[-]	relativní hustota spalin
ϵ_0	$[F \cdot m^{-1}]$	absolutní permitivita vakua
ϵ_1	[-]	relativní permitivita plynu
ϵ_p	[-]	relativní permitivita částice
η_{EO}	[%]	celková účinnost EO
η_p	[%]	účinnost odlučování částice
λ	[m]	střední volná dráha iontů
μ_{spal}	$[Pa \cdot s]$	dynamická viskozita spalin
ρ_{spal}	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota spalin

Seznam příloh

Příloha P01	<i>Aparatura EO</i>
Příloha P02	<i>Cesta kouřovodu</i>
Příloha P03	<i>Vedení drátů</i>
Příloha P04	<i>Usazovací elektroda</i>
Příloha P05	<i>Návarek na šamot</i>
Příloha P06	<i>Příruba trubková</i>
Příloha P07	<i>Trubka usazovací</i>
Příloha P08	<i>Plech přírubový</i>
Příloha P09	<i>Roura 250_100_2</i>
Příloha P10	<i>Plech kotvící dráty horní</i>
Příloha P11	<i>Plech na přívod VN</i>
Příloha P12	<i>Plech kotvící dráty dolní</i>
Příloha P13	<i>3D model aparatury EO</i>
Příloha P14	<i>Fotografie aparatury EO</i>