VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

OPTIMALIZACE METODY PRO HODNOCENÍ ŠPINIVOSTI ETICS
OPTIMIZATION OF METHOD FOR EVALUATION ETICS DIRTINESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Jindřich Gabriel
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. NIKOL ŽIŽKOVÁ, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jindřich Gabriel
Název	Optimalizace metody pro hodnocení špinivosti ETICS
Vedoucí práce	doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2020
Datum odevzdání	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Yilmaz, E. et al. Environmental performance analysis of insulated composite facade panels using life cycle assessment (LCA), Construction and Building Materials, Vol. 202 (2019), p. 806–813.

Tivary, A. et al. Field evaluation of precipitation interception potential of green façades, Ecological Engineering, Vol. 122 (2018), p. 69–75.

Igbal, M. Diagnostic approach for quantifying the soiling level and the aging of limestone façade, Journal of Building Engineering, Vol. 7 (2016), p. 292–299.

ČSN 73 2901 Provádění vnějších tepelně izolačních kompozitních systémů (ETICS), 2017.

ČSN 73 0540-2 Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky, 2011.

Další příslušné technické normy a odborná literatura.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Na vnější tepelně izolační kompozitní systémy (ETICS – External Thermal Insulation Composite Systems), které jsou stavební praxí hojně používány pro vnější opláštění budov, jsou kladeny požadavky nejen technické, ale také estetické. Architektonická řešení pracují s různými povrchovými úpravami a širokou škálou barevnosti. V souvislosti s řešením otázky estetického působení ETICS je nutné se zabývat odolností povrchových úprav vůči zašpinění, se kterým se setkáváme nejen v industriálních oblastech. Diplomová práce bude zpracována ve spolupráci s firmou DEK a.s. a bude navazovat na diplomovou práci Ing. Jakuba Krejčíka (2018).

V diplomové práci proveďte:

1. Za použití tuzemské a zahraniční odborné literatury zpracujte rešerši zaměřenou na faktory způsobující zašpinění fasád a popište možnosti sledování míry zašpinění.

2. Na základě Vámi zjištěných skutečností navrhněte optimalizaci zkušební metody umělého zašpinění ETICS navržené v roce 2018 Ing. Jakubem Krejčíkem.

3. Připravte vhodná zkušební tělesa a na nich optimalizovanou metodu v laboratorních podmínkách ověřte. Pozornost zaměřte na návrh kvantifikovatelného posouzení dosažené míry zašpinění.

4. Proveďte analýzu dosažených výsledků a vyvoďte závěry týkající se vhodnosti použití navržených postupů ve stavební praxi.

Rozsah práce 60–80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou ulpívání znečištění na konečných povrchových úpravách systému ETICS. Teoretická část se zabývá různými faktory a procesy, které ovlivňují míru ulpění znečištění. Praktická část diplomové práce navazuje na diplomovou práci Ing. Jakuba Krejčíka. Byla navrhnuta optimalizace zkušební metody simulování umělého znečištění na testovaných vzorcích. Tyto vzorky byly následně laboratorně vyhodnoceny a také porovnány s omítkami, které byly vystavené reálnému znečištění z přirozeného prostředí.

Klíčová slova

ETICS, fotokatalýza, prachové částice, znečištění, popílek, šnekový dopravník, termoprecipitace.

Keywords

ETICS, photocatalysis, dust particles, pollution, ash, screw conveyor, thermo precipitation.

Abstract

This diploma thesis deals with the issue of adhesion of pollution to the final surface treatments of the ETICS system. The theoretical part deals with important factors and processes that affect the degree of adhesion of pollution. The practical part of the diploma thesis follows the diploma thesis of Ing. Jakub Krejčík. Optimization of test methods for simulation of artificial pollution on tested samples was proposed. These samples were then evaluated in the laboratory and also compared with plasters that were exposed to real pollution from the natural environment.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jindřich Gabriel *Optimalizace metody pro hodnocení špinivosti ETICS.* Brno, 2021. 82 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Optimalizace metody pro hodnocení špinivosti ETICS* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 28. 5. 2021

Bc. Jindřich Gabriel
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Optimalizace metody pro hodnocení špinivosti ETICS* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28. 5. 2021

Bc. Jindřich Gabriel
autor práce

Poděkování

Chci poděkovat doc. Nikol Žižkové, Ph.D, vedoucí mé diplomové práce, za pomoc, za vedení a cenné rady při zpracovávání této diplomové práce. Chci také poděkovat Ing. Antonínu Žákovi, Ph.D za možnost zpracovávat praktickou část diplomové práce ve firmě DEK a.s., cenné rady a nápady při návrhu metodiky. Dále chci poděkovat Ing. Tomáši Klossovi taktéž za cenné rady a nápady během modelování v programu Fusion 360. Za závěr děkuji mé rodině za podporu během mého studia.

Obsah

ÚVOD **10**

1 TEORETICKÁ ČÁST **12**

1.1 Systém ETICS **12**
1.1.1 Provádění systému ETICS 13
1.1.2 Rozdělování omítek podle použití ve stavbě 14
1.1.3 Typy omítek 14
1.1.4 Místo přípravy omítek 15
1.1.5 Rozdělení omítek podle druhu pojiva 15
1.1.6 Aplikace omítek 16
1.1.7 Složení omítek 16
1.1.8 Druhy omítek 17

1.2 Zdroje znečištění ovzduší **19**
1.2.1 Spalování pevných paliv 19
1.2.2 Silniční doprava 21
1.2.3 Snižování emisí NO_X 22
1.2.4 Oxid siřičitý 23
1.2.5 Přízemní (troposférický) ozon 24
1.2.6 Prachové částice 24
1.2.7 Měření znečištění 25

1.3 Znečištění fasád **27**
1.3.1 Biologické 27
1.3.2 Nebiologické 28
1.3.3 Elektrostatické působení 28
1.3.4 Vliv elektrostatického náboje na ulpění nečistot 29
1.3.5 Termoprecipitace 30
1.3.6 Fotokatalýza 32
1.3.7 Historie a vývoj fotokatalýzy 32
1.3.8 Princip fotokatalýzy 32
1.3.9 Homogenní fotokatalýza 32
1.3.10 Heterogenní fotokatalýza 33
1.3.11 Oxid titaničitý 33
1.3.12 Rutil 34
1.3.13 Anatas 34
1.3.14 Brookit 35

1.4 Optické analytické metody **36**
1.4.1 Rozdělení analytických metod 36
1.4.2 Spektrofotometrie 37
1.4.3 Spektrální oblasti 37
1.4.4 Princip spektrofotometrie 38
1.4.5 Přístroje používané pro měření 38

2 PRAKTICKÁ ČÁST **39**
2.1.1 Stanovení změny barevného odstínu nátěru 40

2.1.2 Nezávislé barvové prostory 41

2.2 Etapa I – příprava vzorků 42
2.2.1 Typy použitých omítek 42
2.2.2 Příprava vzorků 44

2.3 Etapa II – návrh a testování dávkovacího zařízení 46
2.3.1 Zkušební médium 47
2.3.2 Dávkovací zařízení č. 1 49
2.3.3 Princip zařízení 52
2.3.4 Dávkovací zařízení č. 2 52

2.4 Etapa III Simulování umělého znečištění 60

2.5 Etapa IV Vyhodnocení a výsledky 65

2.6 Diskuse výsledků 70

2.7 Závěr 73

3 ZDROJE: 75

4 SEZNAM OBRÁZKŮ: 79

5 GRAFY: 80

6 SEZNAM TABULEK: 80

Úvod

V dnešní době je kladen velký důraz na ekonomickou i ekologickou stránku budov, zejména na jejich vytápění. Energetickou náročnost vytápění lze významně snížit využitím různých způsobů zateplení, které se aplikují nejčastěji na venkovní schránku budov.

Vnější kontaktní zateplovací systém, označovaný zkratkou ETICS (external thermal insulation composite system – vnější tepelněizolační kompozitní systém), je v našich klimatických podmínkách nejvíce využívaný pro docílení snížení potřebné energie na vytápění a také z důvodů estetických či architektonických.

Lze sledovat vysoce stoupající míru zástavby, průmyslové výroby a také nárůst silniční, letecké či lodní dopravy. Všechny tyto aspekty způsobují vysokou míru znečištění dostávajícího se do atmosféry, které zejména kulminuje v blízkosti těchto zdrojů znečištění a také v městské aglomeraci. Systém ETICS je nepřetržitě vystaven atmosférickým vlivům, biotickým napadením nebo znečištění obsažených v ovzduší. Tyto vlivy mohou významně negativně ovlivňovat celkovou životnost ETICS nebo estetický vjem. Znečištění fasád zhoršuje jejich architektonický vzhled, spoluvytváří podmínky pro biotické napadení, čímž přispívá ke snížení celkové životnosti zateplovacího systému ETICS. Proto je vhodné věnovat pozornost ochraně a sanaci těchto zateplovacích systémů.

V současné době není zaveden žádný systém měření znečištění, které by určilo a vyhodnotilo míru znečištění ulpěného na povrchu fasád budov. Z tohoto důvodu si tato diplomová práce klade za cíl navrhnout a vytvořit vhodné zařízení pro simulaci špinění povrchových úprav systému ETICS a dále také navrhnout metodiku pro posouzení a vyhodnocení míry znečištění a faktorů, které toto znečištění způsobují a ovlivňují.

Cíl práce

Diplomová práce se zaměřuje na shrnutí všech faktorů způsobující zašpinění povrchů fasád a možnosti sledování míry těchto znečištění. Dále se diplomová práce zaměřuje na optimalizaci zkušební metody umělého zašpinění zateplovacího systému ETICS, navržené Ing. Jakubem Krejčíkem v roce 2018, včetně hodnocení dosažené míry zašpinění u testovaných vzorků.

1 Teoretická část

1.1 Systém ETICS

Systém ETICS (external thermal insulation composite system) je vnější kontaktní tepelněizolační kompozitní systém, který je v České republice rozšířenější technologií pro docílení zlepšení tepelně technických vlastností obvodových plášťů budov.

Tepelně technické vlastnosti jsou získány pomocí vrstvy tepelné izolace, nejčastěji z tuhých tepelných izolací na bázi:

- pěnového polystyrenu,
- minerální vlákna,
- polyuretan,
- polyisokyanát.

1. Zdivo
2. Stěrková základní vrstva
3. Penetrační vrstva
4. Tepelná izolace
5. Skleněná síťovina (perlinka)
6. Dokončovací vrstva
7. Omítka (konečná povrchová úprava)

Obr. č. 1 Skladba systému ETICS. [23]

Technické požadavky na provádění zhotovitelem vnějších tepelněizolačních kompozitních systému (ETICS) stanovuje česká technická norma ČSN 73 2901 pro tepelně izolační výrobky z pěnového polystyrénu EPS nebo z minerální vlny MW.

1.1.1 Provádění systému ETICS

Klimatické podmínky při provádění – norma ČSN 73 2901 uvádí, že teplota vzduchu po dobu technologických operací při provádění ETICS a dále následně po dobu stanovenou v dokumentaci ETICS nesmí být nižší než +5 °C a vyšší než +30 °C a jeho relativní vlhkost musí být nižší než 85 °, nestanovuje-li dokumentace ETICS jinak. Musí být zajištěna ochrana před deštěm po dobu technologických operací při provádění ETICS a po dobu, kdy může dojít k nežádoucímu ovlivnění vlastnosti ETICS a jeho součástí. Dále musí být zajištěna ochrana ETICS před negativními vlivy přímého slunečního záření po celou dobu provádění, včetně doby, kdy může dojít k jejich působení (např. ztráta záměsové vody).

Norma ČSN 73 2901 definuje rozhodující technologické operace při provádění ETICS následujícím způsobem:

- příprava podkladu pro ETICS,
- lepení tepelněizolačního výrobku,
- osazování mechanicky upevňovacího prostředku,
- provádění základní vrstvy,
- provádění konečné povrchové úpravy.

1.1.2 Rozdělování omítek podle použití ve stavbě

Z důvodu odlišných podmínek venkovního a vnitřního prostředí staveb jsou vyráběny dva typy omítek, které se liší fyzikálně mechanickými, estetickými parametry atd. Z tohoto důvodu se liší materiálová báze interiérových a exteriérových omítek.

Vnitřní omítky (interiérové) - v současné době je nejvíce využívanou povrchovou úpravou do interiéru vápenná a vápeno–sádrová omítka. Oproti jiným omítkám jsou na ně vyžadovány nižší požadavky na pevnost, musí být schopny přenést zatížení speciálními povrchovými úpravami, jako jsou tapety, malby atd. Důležitým kritériem je estetický vzhled.

Vnější omítky (exteriérové) - musí být odolné proti klimatickým vlivům, zejména proti působení vlhkosti (déšť, sníh, mráz). Pro ochranu proti dešti se používají hydrofobizační přísady, vnější omítky by měly být vodoodpudivé. Kvůli vyššímu mechanickému zatížení by měly vykazovat vyšší pevnosti než vnitřní omítky. Vnější omítky obsahují nejčastěji cemento–vápenné pojivo. Nikdy nesmí obsahovat sádrové, jelikož na povětrnosti rychle degraduje. [1]

1.1.3 Typy omítek

Omítka tvoří lícní plochu konstrukce. Ochraňuje stavbu před atmosférickými vlivy a mechanickému poškození. Omítky rozdělujeme podle následujících kritérií:

- místo přípravy,
- technologie přípravy,
- místo aplikace,
- počet vrstev,
- použití,
- barevnost. [1]

Technická dokumentace k provádění ETICS dle ČSN 73 2901 přesně specifikuje skladbu ETICS, včetně typů a tlouštěk izolačních materiálů, jejich počet, rozmístění a polohu, dále specifikuje upevňovací prostředky a řešení detailů. ETAG 004 je řídícím pokynem pro evropská technická schválení pro ETICS s omítkou určených k použití jako vnější izolace stěn budov, které jsou obvykle zhotoveny ze zdiva (z cihle, tvárnic apod.) nebo betonu (monolitického nebo z prefabrikovaných panelů). Jedná se o podklad sloužící pro technické posouzení vhodnosti výrobku k určenému použití. [1]

1.1.4 Místo přípravy omítek

Omítka připravená v „in situ“ – tradiční způsob přípravy omítky za použití míchačky, popřípadě ručně přímo na stavbě. Je zapotřebí dodržovat přesné dávkování všech složek (písek, cement, vápno atd.). Průmyslově vyráběné – momentálně nejčastější způsob výroby omítek dodávané zejména v práškové formě v pytlích, popřípadě v tekuté formě. Hlavní výhodou je možnost kontroly dávkování a technologického postupu. Na obr. č. 2 je ukázka omítky připravené in situ. [1]

Obr. č. 2 Příprava omítky „in site“[29]

1.1.5 Rozdělení omítek podle druhu pojiva

Omítky lze rozdělit podle druhu pojiva, které obsahují následovně:

- minerální,
- silikátové,
- silikon-silikátové,
- silikonové,
- akrylátové. [1]

Pojiva se přidávají do omítek pro získání požadovaných vlastností. Pojiva v minerálních omítkách způsobují chemickou reakci (hydrataci) se záměsovou vodou a následně směs tuhne a tvrdne. Pojiva u silikátových omítek dlouhodobě reagují s plnivy, pigmenty a minerálními složkami obsaženými v omítce. [1]

Omítky s cementově vápenatými pojivy potřebují z důvodu své vysoké pórovitosti a sorptivitě další vrstvu fasádní barvy jako konečnou povrchovou úpravu. Pro docílení snížení povrchové pórovitosti je žádoucí použít silikátovou barvu, která vyplní póry a tím zabrání ulpění znečištění na povrchu omítky a také zabrání průniku vody do struktury omítky. [1]

1.1.6 Aplikace omítek

- Ruční – ručně nanášené omítky bývají připravené přímo na staveništi a nanášejí se na povrch pomocí hladítek. Bývají často složeny pouze ze základních složek (plnivo, pojivo a záměsová voda).
- Strojní – na strojní nanášení se využívá mísící stroj pro omítky, která dále putuje do omítacího stroje nanášejícího vrstvu omítky. Vrstva je následně uhlazena do potřebné tloušťky. Strojní nanášení je vhodné pro všechny typy omítek s velikostí největšího zrna do 3 mm. Omítka bývá připravena mimo staveniště, tím pádem musí být na staveniště dovezena autocisternami, což může způsobovat sedimentaci a tím pádem i rozdíly skladby zrnitosti křivky plniva. Z tohoto důvodu je zapotřebí před aplikací opětovně omítku promíchat. Hlavní výhodou této metody je rychlost realizace omítky a výsledná kvalita. [1]

1.1.7 Složení omítek

Omítky jsou kompozitní materiály. Obsahují pojivo, plnivo, případně přísady a výztuž. Podle účelu použití jsou nejčastější pojiva na bázi sádry, vápna, cementu, silikonu, akrylátu atd. Pro dosažení specifických vlastností mohou být použity v omítkách příměsi (pigmenty, hydrofobní přísady z důvodu vodoodpudivosti). K omezení trhlin v problematických detailech (styk konstrukčních prvků rozdílné materiálové báze – železobeton a cihelné zdivo) lze využít doplňkové prvky (lišty, armovací tkanina). Mezi hlavní složky dělíme:

- Pojiva – rozdělujeme na anorganická a organická. Po smíchání s vodou tvoří zpracovatelnou směs, která po ztuhnutí a ztvrdnutí získá potřebné fyzikální a mechanické vlastnosti. Anorganická pojiva jsou nejvíce využívána a patří mezi ně zejména vápno, cement a sádra. Organická pojiva se využívají pouze ve speciálních případech.
- Plniva - jsou materiály, které homogenizací s pojivy a vodou tvoří malty použitelné pro zdění a omítání. Plniva můžou být látky anorganického i organického původu, které vzhledem ke své zrnitosti vytvářejí pevnou kostru zatvrdlých malt a betonů. Nejčastěji se do omítek používají anorganická ostřiva, především písky, které mohou být doplňovány i dalšími látkami

(drcený a mletý vápenec, perlit atd.). Lze používat i lehká kameniva, především pro zvýšení tepelně izolačních vlastností omítek. V některých případech se používají i ostřiva organická.

- Přísady – přidávají se pro zvýšení nepropustnosti, zvýšení přilnavosti k podkladu, k vzájemnému propojení všech součástí ve vrstvě omítky a také například pro zlepšení zpracovatelnosti. Přísady přidáváme v malém množství, řádu desetin až celých procent. Lze jimi zlepšit určité vlastnosti. Při nesprávnému podílu přidané přísady může mít i záporný účinek. To se může projevit ve špatném tuhnutí, vysychání omítky, v malé pevnosti, ve zbarvení. [1]

1.1.8 Druhy omítek

- Pastovité omítky

Pastovité omítky jsou v současné době ve stavebnictví velmi často využívané. Mezi jejich hlavní výhody lze uvést:

- rychlá aplikace,
- výborné mechanicko-fyzikální vlastnosti,
- estetická odlišnost oproti dříve využívaným omítkám (březolit, štuk atp.)
- široká barevná škála barev,
- možnost renovace či oprav již hotových povrchových úprav,
- paropropustnost,
- vodoodpudivý povrch,
- odolné vůči organickým znečišťujícím činitelům (řasy, houby atp.).

Aplikace probíhá pomocí válečku takzvaně do kříže (vertikálně a následně vodorovně).

Obr. č. 3 Vertikální aplikace pastovité omítky válečkem. [30]

Obr. č. 4 Vodorovné nanášení pastovité omítky pomocí válečku. [30]

- Vápenné omítky ze vzdušného vápna

V zdušné vápno se skládá převážně z oxidu nebo hydroxidu vápenatého. Tuhne i tvrdne pouze na vzduchu. Pro výrobu vzdušného vápna je využíván jako surovina čistý vápenec, dolomitický vápenec slouží pro výrobu dolomitického vápna.

Vápenec je hornina, která se skládá převážně z kalcitu, který je z chemického hlediska uhličitan vápenatý $CaCO_3$. Čistý vápenec obsahující téměř 100 % kalcitu se v přírodě vyskytuje pouze zřídka, jelikož bývá znečištěn jílovými minerály nebo také dolomitem $CaCO_3.MgCO_3$. Obsah jílových minerálů určuje využití vápence pro výrobu vzdušného nebo hydraulického vápna, popřípadě také portlandského cementu. Surovina se natěží a je vypalována v rotačních nebo šachtových pecích při teplotě výpalu v rozmezí 1050 °C až 1250 °C. Během pálení dochází k rozkladu vápence, eventuálně dolomitu, na oxid vápenatý CaO, respektive oxid hořečnatý a oxid uhličitý podle následující rovnice:

$$CaCO_3 \cdot MgCO_3 \rightarrow CaO + MgO + 2\,CO_2$$

Výsledný produkt nazýváme pálené vápno. Jeho vlastnosti ovlivňuje mimo jiné jeho struktura. Struktura závisí na teplotě výpalu a ovlivňuje jeho následující vlastnosti:

- aktivitu,
- rychlost hašení vápna,
- vydatnost,
- plasticitu.

Kvalita vápna se posuzuje zejména podle množství vybaveného tepla a podle rychlosti hydratační reakce po smíchání se záměsovou vodou. Vápna pálená na nižší teplotu (do 1050 °C) nazýváme měkce pálená. Mají nízkou objemovou hmotnost z důvodu vysoké porozity a velikostí měrného povrchu. Reakce se záměsovou vodou probíhá na velké ploše povrchu zrn, tak i uvnitř pórů, což způsobuje rychlou a dokonalou hydrataci v krátké době.

Vápna pálená na vyšší teplotu (nad 1050 °C) nazýváme tvrdě pálená. Vyrábí se v šachtových pecích a jako palivo je použit koks. Jejich objemová hmotnost je vyšší, menší porozita a tím pádem také menší měrný povrch. Z důvodu těchto vlastností je hydratační reakce po smíchání se záměsovou vodou, pomalejší oproti měkkým vápnům. Záměsová voda musí difundovat hydratačními produkty k nezreagovanému povrchu zrn vápna, takže následující průběh hydratace je řízen difúzní rychlostí. Hašení vápna je hydratační reakce oxidu vápenatého CaO za vzniku hydroxidu vápenatého Ca $(OH)_2$ a uvolnění tepla podle následující chemické rovnice:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 1161\ J \cdot g^{-1}$$

1.2 Zdroje znečištění ovzduší

Znečištění ovzduší je způsobeno činností člověka nebo přírodními zdroji. Mezi nejvýznamnější zdroje znečištění patří:

- spalování pevných paliv (lokální topeniště),
- silniční doprava,
- průmysl a energetika,
- zemědělství,
- eroze.[2]

1.2.1 Spalování pevných paliv

Lokální topeniště (domácnosti) jsou největším znečišťovatelem ovzduší v současné době. Uvolňují velké množství emisí v podobě tuhých látek a benzo[a]pyrenu. Podíl domácností na emisích v podobě prachových částic frakce $PM_{2,5}$ (prachové částice o velikosti menší než 10 μm) je 78 % a emise způsobené benzo[a]pyrenem 98,4 % [3] Prachové částice jsou podrobněji popsány v kapitole „Prachové částice“.

Obr. č. 5 Lokální topeniště. [31]

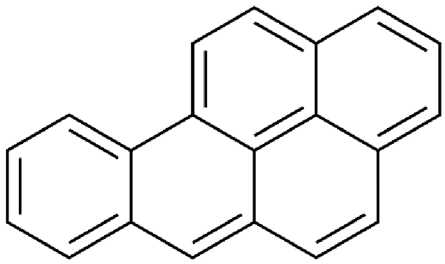
Benzo[a]pyren $C_{20}H_{12}$ je produkován hlavně spalovacími procesy při teplotách v rozmezí (300–600) °C, u kterých došlo k nedostatečné oxidaci přítomných organických

spalitelných látek. To znamená, že dochází k nedokonalému spalování a vzniká oxid uhelnatý (CO), který je prudce jedovatý plyn a je možné jej dále spalovat. [4]

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO$$

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$$

Benzo[a]pyren je karcinogenní látka, která je v atmosféře relativně stabilní a navazuje se na pevné částice. Rozkládá se vlivem slunečního záření, reakcí s ozónem nebo oxidem dusičitým (NO_2). [5]



Obr. č. 6 Schéma benzo[a]pyrenu $C_{20}H_{12}$ [32]

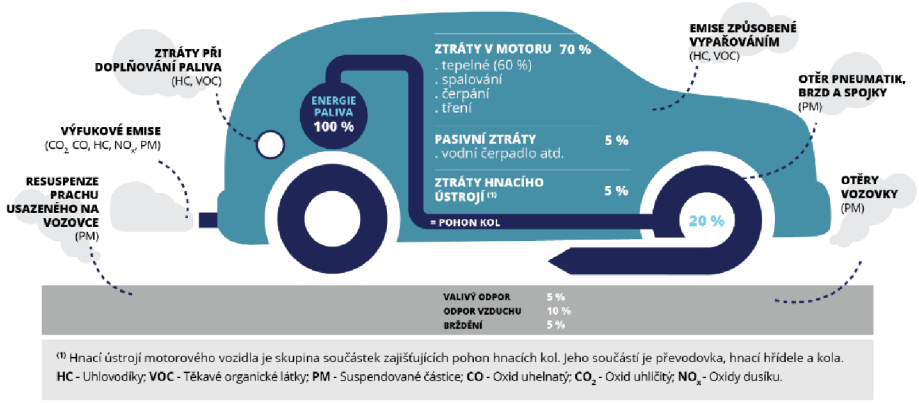
Problematiku lokálních topenišť řeší zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší v platném znění. Tento zákon udává povinnosti provozovatelům lokálních topenišť (jmenovitý příkon do 300 kW včetně). Zákon také umožňuje kontroly, zda jsou dané povinnosti plněny, pro orgán ochrany ovzduší. [5]

Mezi nejčastější pochybení patří:

- použití jiného druhu paliv než je uvedeno výrobcem zdroje (kotel, krb atp.) se kterým není testován a uveden na trh,
- nedodržení maximálního obsahu vody v palivovém dřevě,
- použití uhlí o jiné zrnitosti nebo uhelného sortu. [5]

1.2.2 Silniční doprava

Silniční doprava uvolňuje do ovzduší zejména emise v podobě oxidů dusíku (oxid dusičitý), prachové částice (frakce PM_{10} a $PM_{2,5}$ - prachové částice o velikosti menší než 10 µm a 2,5 µm), oxid uhelnatý a uhlovodíky. Emise se dostávají do ovzduší pomocí výfukových plynů osobních či nákladních vozidel, funkcí brzdových destiček, funkcí spojky a také resuspenzí (rozvíření) prachových částic z povrchu vozovky vlivem projíždějících vozidel. [6]



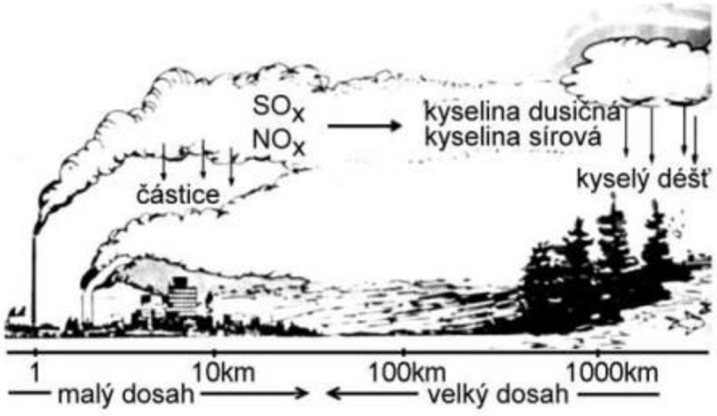
Obr. č. 7 Emise a účinnost vozidel. [33]

Oxidy dusíku NO_x jsou obecně označovány jako dva druhy oxidů dusíku a to oxid dusnatý NO a oxid dusičitý NO_2. Pokud je dusík uvolněný, při procesu spalování do atmosféry, reaguje zde s kyslíkem a vytváří oxid dusnatý $(NO)_X$, který se následně oxiduje na oxid dusičitý (NO_2). Oxidy dusíku jsou příčinou vzniku kyselých dešťů a smogu. Zároveň též přispívají ke vzniku jemných prachových částic (PM) a přízemního ozónu. Zdrojem těchto oxidů je jakýkoliv proces spalování za přítomnosti kyslíku, zejména při vysokých teplotách. Toto znečištění je velmi úzce spjato s automobilovou dopravou, zejména ve velkých městech, kde při dopravních špičkách dochází k velkému zvýšení koncentrace NO_x v atmosféře. V přírodě vznikají tyto oxidy například při výboji blesku. [6]

1.2.3 Snižování emisí NO_X

Metody snižování NO_X dělíme na:

- primární,
- sekundární.

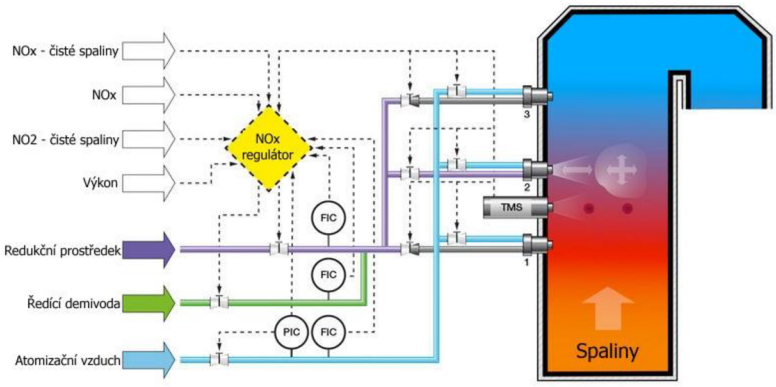


Obr. č. 8 Vliv NOx a SOx. [34]

Primární metoda využívá znalosti o vzniku NOX a z jejich analýzy vyplývá, že během spalovacího procesu lze snížit vznik NOX pomocí snížení spalovací teploty, snížení koncentrace kyslíku O2 v plameni a zkrácení doby pobytu reagujících látek v oblastech s příznivými podmínkami pro vznik NOX. V praxi nelze dosáhnout výrazného snížení vzniku NOX pouze jedním způsobem, proto se běžně využívá kombinace těchto uvedených způsobů. Dále se provádí také regulace množství spalovacího vzduchu, úprava konstrukce hořáků, recirkulace spalin, chlazení plamene vzduchem a stupňování přívodu paliva. [7]

Sekundární metoda odstraňuje již obsažený NOX ze spalin. Nejpoužívanější jsou metody selektivní nekatalytická redukce (SNCR) a selektivní katalytická redukce (SCR).

Metoda selektivní nekatalytické redukce spočívá ve vytvoření redukčních podmínek pomocí vstřikováním čpavku NH_3 (amoniak) nebo močoviny CH_4N_2O do kotle, čímž se takzvaně selektivně (přednostně) snižují oxidy elementárního dusíku a vodní páry. Účinnost této metody, pro snížení vzniku NO_X, se pohybuje kolem 40 až 60 % v oblasti teplot od 900 až do 1050 °C. Čpavek je toxická látka se štiplavým zápachem, proto se častěji využívá močovina jako redukční činidlo. [7]



Obr. č. 9 Schéma SNCR technologie. [35]

Selektivní katalytická reakce funguje na stejných chemických principech jako selektivní nekatalytická redukce, avšak za výrazně nižních teplot a to 300 °C až 400 °C díky využití katalyzátoru. Katalyzátory jsou vyrobeny z oxidů vanadu, molybdenu, wolframu nebo kombinací. Redukční činidlo je vstřikováno do spalin, které jsou dále zavedeny do katalyzátorového reaktoru. Oxidy dusíku, obsažené ve spalinách, se mění na vodní páru a dusík. Účinnost této metody pro snížení vzniku NO_X je kolem 80 % až 90 %. Nevýhoda této metody je nízká životnost katalyzátorů a zároveň jejich vysoká cena. [7]

1.2.4 Oxid siřičitý

Oxid siřičitý (SO_2) je bezbarvý, jedovatý a prudce dráždivý plyn. V přírodě se vyskytuje ve vulkanická činnosti a podzemních vodách rozpuštěný jako kyselina siřičitá. Uměle vzniká při spalování fosilních paliv za přítomnosti kyslíku (zejména ruda s obsahem síry), největším producentem jsou tepelné elektrárny a spalovny komunálního odpadu. V atmosféře oxiduje na kyselinu sírovou a s kyselinou siřičitou je příčinou kyselých dešťů.

Odsířením spalin v elektrárnách, teplárnách a spalovnách vzniká energosádrovec ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Odsíření je založeno na vázání oxidu siřičitého do neškodných sloučenin, nebo jeho využití k výrobě kyseliny sírové či síranu amonného, který se používá jako

hnojivo. Metody používané k odsiřování jsou rozlišovány jako suché a mokré. Energosádrovec se ve stavebnictví využívá například pro výrobu sádry na sádrokartonové desky nebo jako regulátor tuhnutí cementu [8]

1.2.5 Přízemní (troposférický) ozon

Přízemní ozon je považován za látku znečišťující ovzduší, která nemá významný zdroj. Vzniká komplexními sekundárními fotochemickými reakcemi v ovzduší, především hlavně s reakcí oxidu dusíku NO_X s těkavými organickými látkami VOC (volatile organic compound). Velký význam při vzniku přízemního ozonu mají meteorologické podmínky. Koncentrace přízemního ozonu narůstá se vzrůstající teplotou a množstvím UV záření. Vyšší relativní vlhkost vzduchu naopak koncentraci přízemního ozonu snižuje. Přízemní ozon je obsažen pouze 10 % z celkového ozonu v zemské atmosféře. Zbylých 90 % připadá stratosférickému ozonu.

Díky vysoké koncentraci přízemního ozonu bývají vyhlášeny smogové situace během letního období (tzv. „letní smog“) z důvodu příznivých podmínek pro jeho vznik. Koncentrace přízemního smogu bývají nejvyšší v oblastech dopravní infrastruktury, jelikož přízemní ozon reaguje s NO_X vzniklý ze silniční dopravy. [9] [10]

1.2.6 Prachové částice

Prachové částice, nebo také polétavý prach, jsou drobné částice o velikosti menší než 10 μm, které jsou schopny volného pohybu v atmosféře.

Prachové částice dělíme podle velikosti:

- PM_{10} – prachové částice o velikosti menší než 10 μm,
- $PM_{2,5}$ - prachové částice o velikosti menší než 2,5 μm,
- PM_1 - prachové částice o velikosti menší než 1,0 μm.

Prachové částice dělíme, podle vzniku a vniknutí do atmosféry, na:

- primární,
- sekundární.

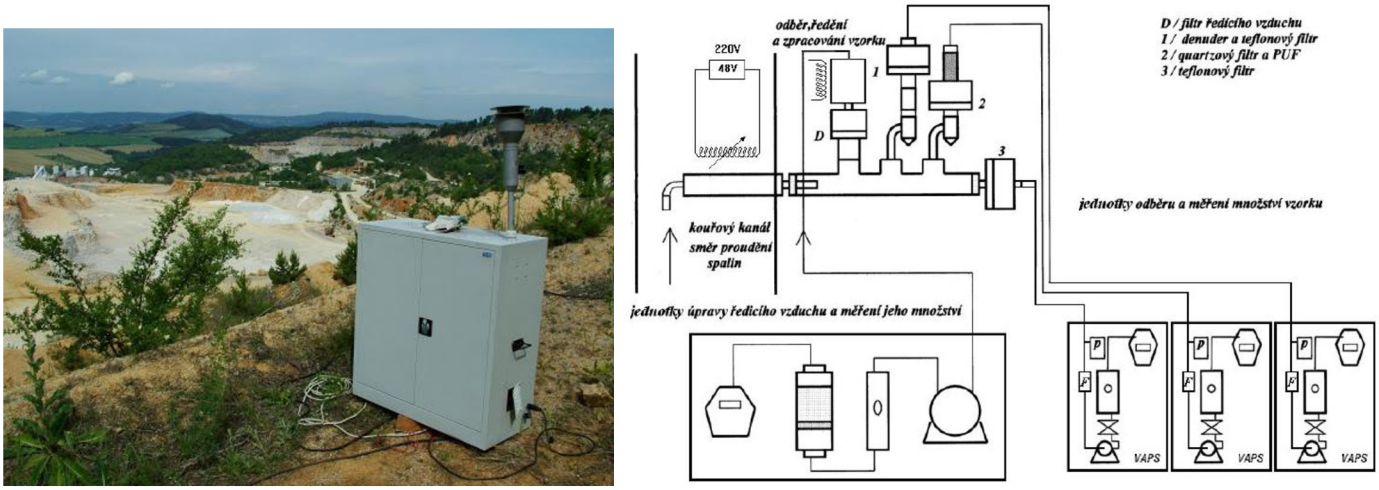
Primární částice vnikají do atmosféry z primárních zdrojů (zvětrání, eroze, pyly, mořské soli, požáry, vulkanická činnost). Sekundární částice vznikají lidskou činností, zejména spalování fosilních paliv, které patří mezi největší producenty způsobující znečištění ovzduší (lokální topeniště, energetika). Dále se na znečištění výrazně podílí také

doprava (spalování, oděrky pneumatik a brzdových destiček), průmysl (výroba stavebních materiálů). Pro lidský organismus se jeví jako nejnebezpečnější prachové částice PM_{10}. [11]

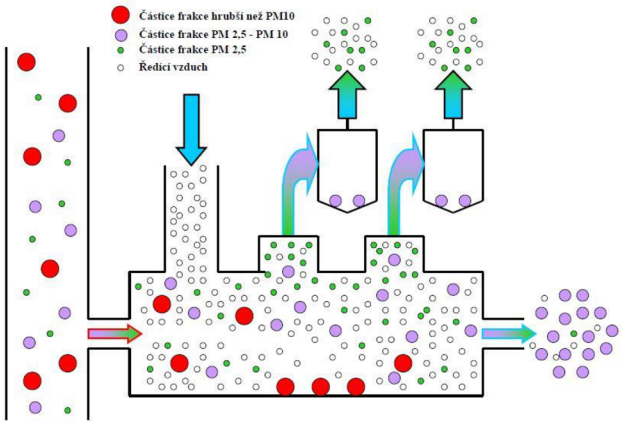
1.2.7 Měření znečištění

Pro měření znečištění v průmyslových komplexech nebo ovzduší se využívá metoda na principu větrně gravitačního třídění částic, který je odvozen od mechanismu třídění, probíhající v atmosféře po trase od zdroje výstupu částic až k příjemci (tzn. dýchací cesty). Zkušební aparatura se skládá z následujících jednotek:

- úprava ředicího vzduchu a měření jeho množství,
- odběr, ředění a zpracování vzorku,
- odběr a měření množství vzorku. [12]



Obr. č. 10 Schéma měřící aparatury. [36]



Obr. č. 11 Metoda měření emise. [36]

Znečištění v ovzduší se měří metodou takzvaného prašného spádu. Zachytává se vše, co spadlo k zemskému povrchu. Dále pomocí plynoměru, čerpadla a filtru, se zkoušený vzduch pomocí čerpadla hnal na filtr, kde se zachytávaly prachové částice a následně došlo ke gravimetrickému vyhodnocení. Tato metoda se používá dodnes jako referenční pro modernější metody měření. Současné postupy měření jsou založeny jednak na gravimetrickém vyhodnocení, ale hlavně na laserové difrakci, kdy jsou zároveň vyhodnocována množství jednotlivých velikosti částic (frakce prachových částic). [12]

1.3 Znečištění fasád

Povrch fasád bývá znečištěn biologickými nebo nebiologickými činiteli, které ulpí na povrchu.

1.3.1 Biologické

Bakterie – jedná se o jednobuněčný organismus o velikosti okolo 0,001 mm. Bakterie je tvořena jednou buňkou, která je pokryta buněčnou stěnou. Rozmnožují se nejrychleji v prostředí s dostatečným přístupem k živinám a při teplotě 37 °C. Můžeme je nalézt defacto kdekoliv. Na povrchu mohou způsobovat degradaci kovů či barevné změny.

Řasy – vyskytují ve vodním prostředí, popřípadě v místech s vysokou vlhkostí nebo v půdě. Pro jejich existenci je zapotřebí přístup slunečního záření. Jsou hlavním producentem biomasy a kyslíku ve vodních ekosystémech. Rozlišujeme je na červenou, hnědou a zelenou větev. Každá větev je složena z chlorofylu a svými specifickými pomocnými barvivy. Pokud dojde k jejich zániku, fungují jako potravina pro množení bakterií.[13]

Obr. č. 12 Řasy na fasádě. [37]

Houby – rozmnožují se ve vlhkém prostředí výtrusy, které ulpí na povrchu fasád budov. Mají tmavě zelené až hnědou či černé zbarvení. Řadíme je na dřevokazné, černé a plísně. Živí se organickým materiálem a uhlíkem.

Mechorosty – neobsahují lignin (amorfní látka) a přežívají pouze ve vlhkém a chladném prostředí. Pokud nemají dostatečné množství vlhkosti, vysychají, avšak po obnovení styku s vlhkostí dochází k obnovení metabolické funkci v řádu hodin. [14]

1.3.2 Nebiologické

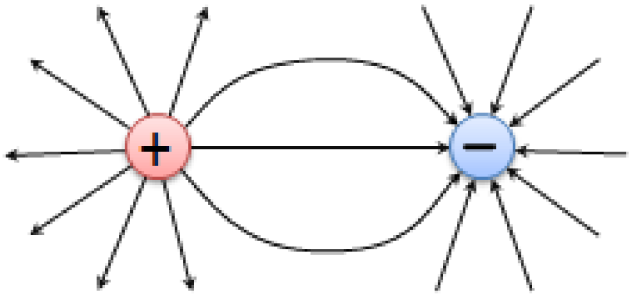
Výkvěty – vznikají, když se nachází v pórovité struktuře rozpustné soli, které se vlivem kapalné vody nebo vysoké vlhkosti dostávají na povrch a vytvoří výkvět.

Obr. č. 13 Výkvěty na fasádě [24]

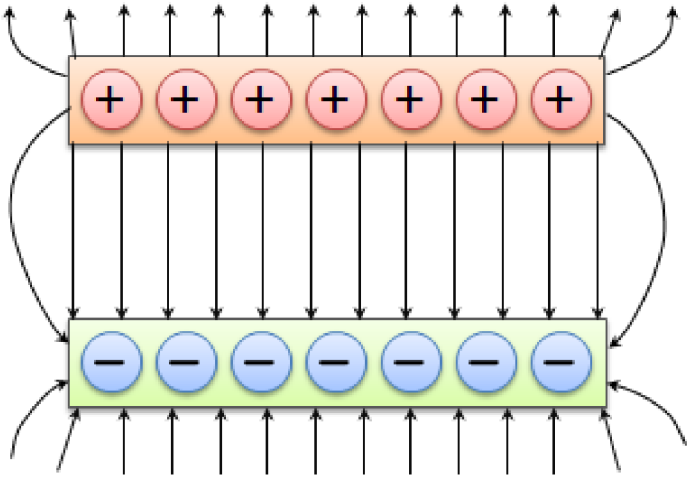
1.3.3 Elektrostatické působení

Nejběžnější způsob vzniku elektrostatického náboje je třením jednoho objektu o druhý. Elektrostatický náboj je pouze dočasný jev a jeho délka trvání je závislá na vodivosti daného materiálu (plast, kov atp.).

Plasty mají vysoký odpor, což znamená, že elektrostatický náboj trvá dlouho. Kovy ztrácejí elektrostatický náboj velmi rychle oproti plastům. Možností, jak přivést náboj na neutrální těleso je více. Pomocí tepla (pyroelektrický efekt), tlaku (piezoelektrický efekt), elektrostatickou indukcí, separací a výše zmíněným třením (triboelektrickým efektem). Při tření dvou těles o sebe dochází k přesunu elektronů z jednoho objektu na druhý.[15]



Obr. č. 14 Nehomogenní elektrostatické pole. [38]



Obr. č. 15 Nehomogenní elektrostatické pole. [38]

1.3.4 Vliv elektrostatického náboje na ulpění nečistot

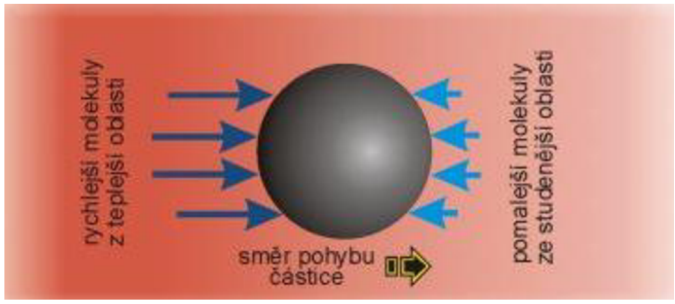
Na konečných úpravách obvodových obálek budov bývá nahromaděn elektrostatický náboj, který vzniká třením nebo indukcí. Částice, které jsou v blízkém okolí jsou tímto elektrostatickým nábojem (kladný a záporný) ovlivňovány. Pokud jsou znamínka elektrostatického náboje totožná, dochází k odpuzování částic od sebe. V opačném případě se částice začnou navzájem přibližovat a shlukovat. Obvodové obálky budov bývají tomuto efektu vystaveny po celou dobu jejich životnosti.

Největší míru elektrostatického náboje způsobuje atmosféra a povrch země. Atmosféra je pod vlivem kladného elektrostatického náboje a zemský povrch má náboj záporný. Tento vliv je intenzivnější s narůstající výškou, kdy stoupá potenciál atmosféry o 100 V za 1 m. Další vlivy jsou například bludné proudy, elektrické přístroje nebo tření částic o povrch. Toto elektrické pole působí na fasádu, na které může indukcí vznikat elektrický náboj. Výrazně může zvýšit hodnotu elektrostatického působení kombinace těchto efektů [16]

1.3.5 Termoprecipitace

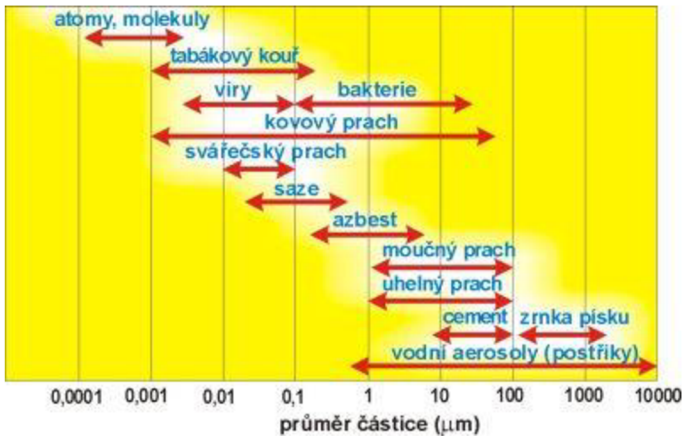
Vzduch, který je plynným disperzním prostředím, obsahuje kapalné i pevné fáze organického a anorganického původu. Tuto směs pevných, kapalných a plynných fází nazýváme aerosol. Vlivem rozdílných teplot se aerosol dostává do pohybu ve směru klesající hodnoty teploty.

Pohyb aerosolu lze popsat prouděním, termodifúzí a termoforézou. Pohyb aerosolu prouděním je nejrychlejší díky rozdílným hodnotám tlaku. Termodifůzí rozumíme přenos tepla skrz pórovitou strukturu. Během termoforézy dochází k pohybu aerosolu v teplotním spádu ve směru klesající hodnoty (například vznik oblaků – vodní kapky vznášející se ve vzduchu, přičemž dojde k setkání teplého a chladného vzduchu). Částice aerosolu získávají v teplejším prostředí více kinetické energie než v chladném prostředí, což způsobí, že více oscilují. Molekuly vzduchu více narážejí na částice obsažené v aerosolu a tím je přesunují do chladnějšího prostředí. Pokud je chladnější místo povrch tělesa, dochází k předání tepelné i kinetické energie a následně k usazení na povrchu. Tento děj se odehrává od teplotních rozdílů v řádech 0,1 °C a nazývá se termoprecipitace. [17] [18]



Obr. č. 16 Schématické znázornění termoforézy. [39]

Termoprecipitace působí jak v interiéru tak i v exteriéru. V interiéru dochází k rychlejšímu a ve větší míře výraznějšímu zašpinění linií nad spárami zdiva nebo u spojů sádrokartonových nebo sádrovláknitých desek. Tato místa jsou tepelné mosty, které však vyhovují v posouzení kritické teploty pro kondenzaci vlhkosti i přesto, že jejich teplota je nejnižší oproti okolí. Tyto okolnosti způsobují v těchto místech nejvyšší míru ulpívání nečistot na povrchu, zejména v zimních obdobích, jelikož je vyšší relativní vlhkost a zvýšená prašnost v interiéru způsobená vytápěním.[17]



Obr. č. 17 Velikost částic vyskytující se ve vzduchu. [40]

Exteriér je ovlivněn větším teplotním rozptylem z důvodu denního cyklu. Venkovní teplota v noci klesá, což způsobí ochlazení povrchu venkovní fasády a nastává vyzařování tepla z konstrukce pomocí radiace. V místě tepelného mostu (místo s vyšší hustotou tepelného toku) dochází k oteplování skladby fasády z interiéru a v době nárůstu venkovní teploty ke snadnějšímu oteplení skladby od exteriéru. [17]

Obr. č. 18 Prokreslení obvodového zdiva na fasádě budovy. [41]

1.3.6 Fotokatalýza

Fotokatalýza je chemický proces, při kterém za určitých podmínek probíhá rozklad organických látek za vzniku radikálů. Dvě nejdůležitější podmínky jsou správný katalyzátor (nejúčinnější je oxid titaničitý ve formě anatasu) a UV záření ve formě světla, tedy správná vlnová délka dopadajícího záření. Fotokatalýza probíhá nejefektivněji při UV světle o vlnové délce 388 nm. Nejznámější příklad fotokatalytického účinku je rozklad barvy na světle, kdy se její organické složky rozloží. [18]

1.3.7 Historie a vývoj fotokatalýzy

V průběhu 70. let 20 století objevil princip fotokatalýzy profesor Michael Grätzel. Dále v roce 1967 ověřil princip fotokatalýzy ve své disertační práci na tokijské univerzitě chemik Akira Fujishima pod vedením profesora Kenichi Honda.

Akira Fujishima vystavoval elektrodu z oxidu titaničitého, umístěnou ve vodě, silnému světlu. Zjistil, že na povrchu elektrody z oxidu titaničitého se tvoří bublinky kyslíku a na druhé elektrodě z platiny vznikal vodík. Jednalo se o rozklad vody. [19]

1.3.8 Princip fotokatalýzy

Fotokatalýzu rozlišujeme na:

- homogenní,
- heterogenní.

1.3.9 Homogenní fotokatalýza

Homogenní fotokatalytická degradace funguje na principu reakce katalyzátoru s ostatními látkami, které jsou na stejné bázi (zejména kapalné nebo plynné). Katalyzátor je redukovaná forma kovu, nejčastěji ionty Fe^{3+}, Mn^{2+} nebo Cu^{2+} a je aktivován světlem. Měďnaté a manganaté vykazují menší fotokatalytickou aktivitu i přes podmínku splnění všech reakčních podmínek (např. dostatečné množství katalyzátoru).

Homogenní fotokatalytická degradace reaguje ve dvou reakcích. Během první reakce se fotochemicky redukuje katalyzátor v přítomnosti donoru elektronu, což je nejčastěji organická látka. V druhé reakci vzniká katalyzovaná reakce substrátu za přítomnosti nejčastěji oxidu kyslíku. Druhá reakce se nazývá také „temná“, jelikož může nadále probíhat i bez přítomnosti světla. [20]

$$Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$$

$$\text{Substrát} + O_2 \rightarrow \text{Substrát}_{ox}$$

1.3.10 Heterogenní fotokatalýza

Na rozdíl od homogenní degradace, u heterogenní fotokatalýzy nejsou všechny složky na stejné bázi. Katalyzátor bývá nanesen v podobě tenké vrstvy. Využívá se nejčastěji oxid titaničitý, dále také například ZnO, Fe_2O_3, ZnS, WO_3, CdTe atd, z důvodu vysokého fotochemického využití.

Průběh heterogenní fotokatalýzy lze popsat následovně:

- transport látek k povrchu katalyzátoru difuzí,
- adsorpce výchozích látek na povrchu katalyzátoru,
- povrchová reakce,
- desorpce produktů,
- transport produktů od povrchu katalyzátoru ven difuzí.[20]

1.3.11 Oxid titaničitý

Oxid titaničitý TiO_2 neboli také titanová běloba je chemicky stálá, polymorfní látka, nerozpustná ve vodě. Jedná se o netoxickou sloučeninu kyslíku a titanu.

V přírodě se vyskytuje ve formě minerálů rutilu, anatasu a brookitu. Podle složení jsou jednotlivé formy stejné (59,94 % titanu a 40,06 % kyslíku), ale jsou různě uspořádané, a proto se liší i svými vlastnostmi jak chemickými, tak i fyzikálními, a nakonec i vzhledem. Existují i další formy TiO_2, ale pouze uměle syntetizované za vysokého tlaku. Nejznámější z nich je například kotunit, který je jeden z nejtvrdších polykrystalických materiálů. Pro fotokatalytické použití se však uplatňuje pouze rutilová a anatasová forma. Při použití některých oxidů kovů (WO_3, ZrO_2, M_oO_2) nebo dopování dusíkem může příznivě ovlivnit průběh fotokatalýzy.

Obr. č. 19 Oxid titaničitý [42]

1.3.12 Rutil

Je nejrozšířenější polymorfní modifikace. Má tetragonální symetrii a tvoří sloupcovité až jehlicové krystaly. Rutilová forma je stabilní i při vysokých teplotách, a proto je v některých vyvřelých horninách (granulit, rula). Jeho struktura je založena na těsném uspořádání atomů kyslíku a titanu. Nejčastější zbarvení je červenohnědé nebo černé s diamantovým nebo kovovým leskem. Je křehký a dokonale štěpný. Průmyslově je z něj získáván TiO_2. Využívá se zejména jako bílý pigment. V ČR byl nalezen ve značné míře v lokalitě Věžná. [21] [22]

Obr. č. 20 Rutil [43]

1.3.13 Anatas

Anatasová forma je stejně jako rutilová tetragonální a většinou se vyskytuje v podobě dipyramidálních krystalů, výjimečně otupené dipyramidy. Díky méně pravidelnému uspořádání je stabilní při nižních teplotách a při vyšších přechází na rutil. Barvu má obvykle černo šedou, více odstínu hnědé, někdy až safírově modrou nebo bezbarvý. Je křehký a dokonale štěpný. Má výrazný polokovový až diamantový lesk. Vyskytuje se zejména na žilách alpského typu.

Ve struktuře anatasu najdeme prvky Nb (niob), Ta (tantal) a Fe (železo). Může obsahovat zřídka také vyšší obsahy Nb_2O_5 se stopami Ta, popřípadě také Ta_2O_5 spolu s Nb_2O_5 a Fe_2O_3. Podobně jako brookit je méně běžný oproti rulitu.[21] [22]

Obr. č. 21 Anatas [44]

1.3.14 Brookit

Podobně anatas je i brookit méně běžný oproti rutilu. Má rombickou symetrii a většinou se vyskytuje ve formě tabulkových krystalů, které mají často výrazné rýhování. Barvu má světle až tmavě hnědou, žlutohnědou až černou nebo průsvitný. Je nevýrazně štěpný a má diamantový lesk.

Nejčastěji se vyskytuje v magmatických horninách jako hydrotermální minerál nebo v puklinách alpského typu. Vzácně lze nalézt také v magmatických horninách Obsahuje Nb, Fe případně Ta. [21] [22]

Obr. č. 22 Brookit. [45]

1.4 Optické analytické metody

Optické analytické metody využívají jevy spojené se vznikem elektromagnetického záření a také vzájemnou interakci záření s analyzovanou látkou. S pomocí různých přístrojů a zařízení lze měřit optické veličiny, které mohou být definovány v matematickém vztahu s měřenou veličinou. [23]

1.4.1 Rozdělení analytických metod

1.4.1.1 Nespektrální metody

Nespektrální metody jsou takové, které nesledují výměnu energie mezi zářením a látkou, nýbrž změny vlastností záření (změna rychlosti. rozptyl, otáčení roviny polarizovaného světla).

Mezi nespektrální metody řadíme:

- refraktometrii,
- interferometrii,
- polarimetrii,
- nefelometrii,
- turbidimetrii.

1.4.1.2 Spektrální metody

Spektrální metody jsou založené na výměně energie mezi zářením a látkou. Spektrum je závislost veličiny, která je mírou intenzity záření vysílaného nebo prošlého vzorkem na vlnové délce záření ***l***. Místo vlnové délky se také používá ***v*** vlnočet v, frekvence **v** nebo energie ***e.***

- **Metody emisní** - spočívají na měření záření vysílaného neboli elimitovaného vzorkem. Emise je vyvolána pomocí dodání energie do vzorku v podobě tepla, elektrické energie, proudu elementárních částic, nebo jiného elektromagnetického záření. Atomy nebo molekuly se pomocí přijetí této energie dostávají do méně stabilních energetických stavů. Přebytečná energie se zabavuje ve formě elektromagnetického záření.
- **Metody absorpční** - sledují pohlcování neboli absorpci záření vzorkem. Využíváme při nich vlnové délky z různých oblastí spektra elektromagnetického záření. Podle použitého záření a charakteru vzorku se dělí na metody (ultrafialová a viditelná spektrometrie, infračervená spektrometrie atd). [23]

1.4.1.3 Základní fyzikální pojmy používané v popisu optických analytických metod

Mezi obecné základní optické pojmy patří:

- Elektromagnetické záření-je druh záření neboli vlnění, vznikající pomocí elektrické a magnetické složkou. Vektory těchto složek jsou v rovinách na sebe kolmých a jejich kmity mají různý směr.
- Vlnová délka λ elektromagnetického záření-je vzdálenost mezi vrcholy dvou sousedních maxim. Vzdálenost se uvádí v [nm]. Vlnová délka rozděluje elektromagnetického záření na záření viditelné – světelné záření neboli světlo. Podle stoupajících vlnových délek se mění zbarvení elektromegnetického záření – fialová, modrá, modrozelená, zelená, žlutá, oranžová, červená. Každé barvě světla odpovídá určitá vlnová délka.
- Frekvence f elektromagnetického záření-udává počet kmitů za sekundu. Frekvence se uvádí v jednotkách [Hz], který odpovídá jednomu kmitu za sekundu.
- Rychlost šíření elektromagnetického záření c-je pro všechny druhy záření přibližně stejná. Ve vakuu činí asi 300 000 km/s.
- Energie elektromagnetického záření E (J/mol) – přísluší jednotlivým typům záření a je charakteristická pro určitou vlnovou délku. [23]

1.4.2 Spektrofotometrie

Spektrofotomerie je objektivní metoda využívaná pro změření záření, které je pohlceno vzorkem.

1.4.3 Spektrální oblasti

Tab. č. 1 *Spektrální oblasti [23]*

Označení	λ [nm]	Absorbující látky
Vzdálená ultrafialová oblast UV far UV (vakuová oblast)	<190	nasycené a monoenové sloučeniny
Blízká ultrafialová oblast near UV	190-380	polynenasycené a aromatické sloučeniny
Viditelná oblast VIS	380-780	barevné látky

Tab. č. 2 *Komplementarita barev [23]*

Barva absorbovaného světla	λ [nm]	Barva absorbující látky
Fialová	400-435	Žlutozelená
Modrá	435-480	Žlutá
Zelenomodrá	480-490	Oranžová
Modrozelená	490-500	Červenooranžová
Zelená	500-560	Purpurová
Zelenožlutá	560-580	Fialová
Žlutooranžová	580-595	Modrá
Červenooranžová	595-620	Zelenomodrá
Červená	620-760	Modrozelená

1.4.4 Princip spektrofotometrie

Spektrofotometrie pracuje na principu měření energie, která je pohlcena látkou při průchodu záření. Pomocí měření jsou zjištěna absorpční spektra. Absorpční spektra jsou vyobrazena graficky jako závislost absorbance na vlnové délce. Kvůli absorpci elektromagnetického záření molekulou dojde ke změně elektronového stavu dané molekuly – vznik elektronových přechodů.

1.4.5 Přístroje používané pro měření

- Spektrofotometry (spektrofotokolorimetry) – pracují při konstantní vlnové délce, zpravidla ve viditelné oblasti spektra.
- Spektrometry – měří absorbanci nebo transmitanci při různých vlnových délkách, také v oblasti UV záření. [23]

2 Praktická část

Praktická část diplomové práce vznikla ve spolupráci s firmou DEK, a.s., konkrétně s Ateliér DEK zajišťující výzkum a vývoj pro DEK, a.s.

Praktická, i teoretická, část diplomové práce navazuje na diplomovou práci Ing. Jakuba Krejčíka z roku 2018. Hlavním cílem je optimalizovat stávající metodiku pro hodnocení špinivosti na povrchu systému ETICS.

V přechozí diplomové práci bylo testováno 18 rozdílných vzorků fasád od různých výrobců na silikonové a také silikonsilikátové bázi. V diskuzi výsledků v diplomové práci Ing. Jakuba Krejčíka je uvedeno, že nebyl zjištěn viditelný rozdíl mezi jednotlivými druhy omítek z pohledu vlivu druhu omítky na míru ulpění nečistot, ale je znatelný rozdíl v jednotlivých testovacích způsobech, které mají vliv na ulpívání nečistot na povrchu testovacích vzorků.

Na základě těchto znalostí byla provedena změna metodiky testování ulpění nečistot na vzorcích fasádních omítek a také byl omezen počet testovaných omítek na dva vzorky fasádní omítky bílého odstínu (pastovitá omítka s fotokatalytickým efektem a pastovitá omítka).

Praktická část byla rozdělena do čtyř etap:

- Etapa I – příprava vzorků,
- Etapa II – návrh a testování dávkovacích zařízení,
- Etapa III – simulování umělého znečištění,
- Etapa IV – vyhodnocení a výsledky

2.1.1 Stanovení změny barevného odstínu nátěru

U zkušebních vzorků, na kterých bylo provedeno simulování znečištění, s finální povrchovou úpravou byly zjištěny změny barevného odstínu pomocí postupů stanovených dle normy ČSN EN ISO 11664-4 Kolorimetrie – Část 4: Kolorimerický prostor CIE 1976 L*a*b*. Stanovení změny barevného odstínu nátěru je prováděno pomocí reflexního spektrofotometru. Tím se určí číselná hodnota ΔE_{CMC}. Tato hodnota stanovuje rozdíl barevného odstínu barvy mezi referenčním a zkušebním vzorkem, které jsou oba ve stejném barevném prostoru. Rovnice pro ΔE_{CMC} popisuje elipsoidní rozhraní, kde referenční vzorek je ve středu elipsoidu a dohodnutá tolerance ΔE_{CMC} popisuje prostor, ve kterém jsou všechny zkoušené vzorky ve vztahu k předloze akceptovatelné. Rozdíl barevného odstínu je složen ze tří složek. Složky zahrnují všechny rozdíly barvy mezi zkušebním a referenčním vzorky a tyto složky dělíme na:

- Světlost – udává se jako ΔL_{CMC}. Kladná hodnota značí, že zkušební vzorek je světlejší než referenční. Záporná hodnota značí přesný opak, to znamená zkušební vzorek je tmavší oproti referenčnímu vzorku.
- Chroma - je charakterizována jako ΔC_{CMC}. Kladná hodnota značí, že zkušební vzorek je brilantnější oproti vzorku referenčnímu. Záporná hodnota, opět jako u světlosti, značí přesný opak a to, že zkušební vzorek je méně brilantní oproti referenčnímu vzorku.
- Stín - ΔH_{CMC} [24]

Tab. č. 3 *Klasifikace odchylky barevného odstínu [24]*

ΔH_{CMC}	Rozdíl
0,0 - 0,2	nepostřehnutelný
0,2 - 0,5	velmi slabý
0,5 - 1,5	slabý
1,5 - 3,0	jasně postřehnutelný
3,0 - 6,0	střední
6,0 - 12,0	výrazný
12,0 - 16,0	velmi výrazný
>16,0	rušící
0,2 - 1,0	postřehnutelný
2,0 - 4,0	rozeznatelný
4,0 - 8,0	ještě nerušící

2.1.2 Nezávislé barvové prostory

Každá barva má svůj jedinečný popis a hodnotu v nezávislém prostoru. Díky těmto okolnostem jsou tyto prostory využívány pro jednoznačný popis barev. Využívá se fyzických vlastností dané barvy nebo vnímání barvy pomocí lidského oka.

Rozlišujeme následující prostory:

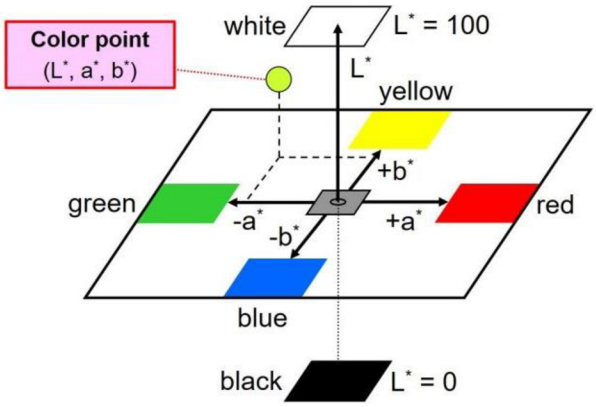
- CIELAB (L*a*b),
- CIE XYZ (xyZ)

2.1.2.1 CIELAB (L*a*b)

Je nestejnoměrná odstupňovaná kolorimetrická soustava, která umožňuje stanovit konkrétní barvu pomocí číselných údajů. Byl zaveden v roce 1976.

V CIALAB jsou barvy vyjádřeny třemi osami:

- L* (ligtness) – vyjadřuje světlost v rozmezí 0 až 100, přičemž hodnota 100 odpovídá bílé barvě a 0 barvě černé,
- a* – vyjadřuje červenou a zelenou barvu,
- b* – vyjadřuje od modré až po žlutou barvu. [24]



*Obr. č. 23 Vyobrazení os pro CIELAB (L*a*b). [24]*

Symbol „*“ udává, že se jedná o nový barevný systém, který pokračuje ve starším systému CIELAB. Tento nový systém se využívá pro vyjádření barev. Rozdíl mezi dvěma barvami (1 a 2) je vyjádřen pomocí veličiny ΔE^*_{ab}, která je stanovena dle matematického vztahu:[24]

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} = \sqrt{(L^*_1 - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2}$$

2.2 Etapa I – příprava vzorků

2.2.1 Typy použitých omítek

Omítka A1

Vnější silikonová probarvená pastovitá omítka určená k přímému použití.

Hlavní složky omítky:

- vápencové plnivo (zrnitost dle označení),
- barevné pigmenty,
- organické pojivo,
- silikonová disperze,
- biocidní prostředky ve formě kapslí,
- výztužná vlákna.

Obchodní označení: weberpass silikon OP 315Z B100 30.

Legenda označení:

- 315Z → zrnitý výrobek 1,5 mm,
- B100 → barevná řada (bílá),
- 30 → hmotnost balení 30 kg. [25]

Základní charakteristiky	Hodnota/třída	Harm. tech. specifikace
Propustnost pro vodní páry	V2	EN 15824:2009
Permeabilita vody	W3	
Soudržnost	≥ 0,3 MPa	
Trvanlivost	NPD	
Tepelná vodivost λ	0,8 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	
Reakce na oheň	A2 s1 d0	

Poznámka: zkratka NPD znamená „no performance determined" (žádný ukazatel není stanoven).

Tab. č. 4 *Deklarované vlastnosti omítky A1 [25]*

Omítka B1

Vnější probarvená modifikovaná silikátová tenkovrstvá omítka se fotokatalytickým efektem. Tento efekt zajišťuje dlouhodobou čistotu povrchu omítky a vysoký stupeň ochrany omítky proti růstu mikroorganismů. Dále tento efekt způsobuje na povrchu reakci rozkládající zplodiny a sloučeniny, které se na povrch ulpívají ze vzduchu. Omítka je připravena k přímému použití.

Hlavní složky omítky:

- vápencové plnivo (zrnitost dle označení),
- barevné pigmenty,
- modifikované silikátové pojivo,
- směs výztužných vláken.

Obchodní označení weberpas extraClean active OP915Z B100 25.

Legenda označení:

- 915Z → zrnitý výrobek 1,5 mm,
- B100 – barevná řada (bílá),
- 25 – hmotnost balení 25 kg. [26]

Základní charakteristiky	Hodnota/třída	Harm. tech. specifikace
Propustnost pro vodní páry	V1	EN 15824:2009
Permeabilita vody	W3	
Soudržnost	≥ 0,3 MPa	
Trvanlivost	NPD	
Tepelná vodivost λ	0,8 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	
Reakce na oheň	A2 s1 d0	

Poznámka: zkratka NPD znamená „no performance determined" (žádný ukazatel není stanoven).

Tab. č. 5 *Deklarované vlastnosti omítky B1 [26]*

2.2.2 Příprava vzorků

Celkově bylo připraveno 48 testovacích vzorků pozinkovaném plechu o rozměru (300 × 300) mm a tloušťce 0,8 mm. Z důvodu nedostatečného tření a soudržnosti při nanášení omítky na pozinkovaný plech, docházelo ke vzniku tahu větších zrn obsažených v omítce po povrchu pozinkovaného plechu a tím dále vznikaly viditelné tahy odkrývající povrch pozinkovaného plechu (viz obrázek 24).

Obr. č. 24 Tahy vzniklé zrny v omítce při aplikaci. Foto autor.

Z tohoto důvodu byl nanesen na povrch všech 48 pozinkovaných plechů adhezní můstek na bázi křemičitého písku, který je určen pro aplikace u exteriérových i interiérových omítek. [17]

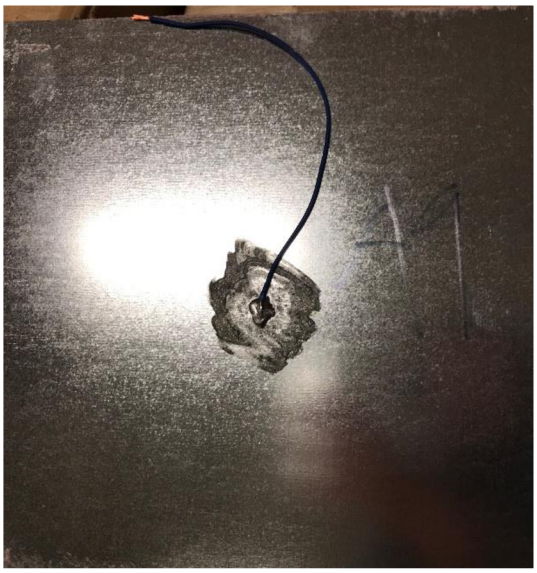
Obr. č. 25 Aplikace adhezního můstku. Foto autor.

Obr. č. 26 Adhezní můstek. Foto autor.

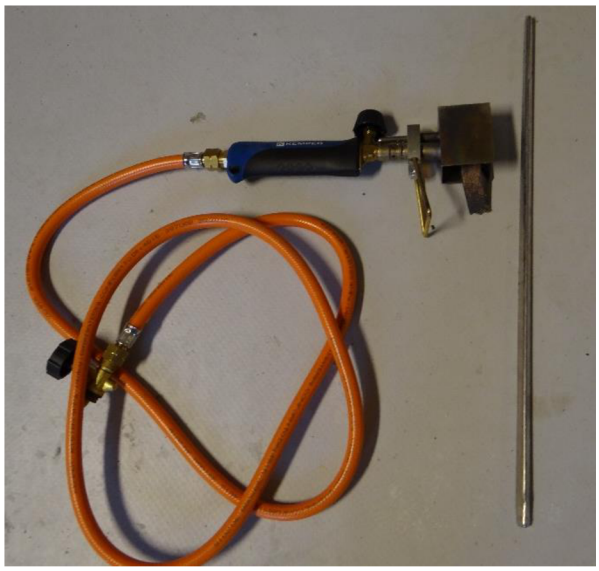
Na již takto připravené pozinkované plechy byly naneseny omítky (24 vzorků pro omítku A1 a 24 vzorků pro omítku B1) pomocí nerezového hladítka po celé ploše a následně vyhlazeny strukturovaným plastovým hladítkem.

Obr. č. 27 Nářadí pro aplikaci omítek. Foto autor.

Z důvodu zkoumání vlivu elektrostatického působení na míru ulpění nečistot na povrchu omítek byly na 22 vzorků (11 s omítkou A1 a 11 pro omítku B1) napájeny na zadní strany pozinkovaného plechu elektrické kabely (viz obr. č. 26) pomocí klempířské pájky a cínu.



Obr. č. 28 Napájený drát na pozinkovaný plech. Foto autor.



Obr. č. 29 Klempířská pájka a cín. Foto autor.

2.3 Etapa II – návrh a testování dávkovacího zařízení

Pomocí dat ze střednědobé strategie zlepšení kvality ovzduší v ČR, konkrétně aglomerace Brno z Ministerstva životního prostředí ČR (zpráva Enviros 2014), bylo vypočítáno množství prachu, které ulpí na povrchu fasád. Nejvyšší naměřená 24hodinová koncentrace poletavých částic PM_{10}, od roku 2003 až do roku 2012, činila 81 [$\mu g/m^3$]. Pomocí hodnot měřených, opět od roku 2003 až do roku 2012, byla vypočtena průměrná 24hodinová koncentrace pro celou aglomeraci Brno, která činila 31,86 [$\mu g/m^3$]. Pomocí těchto zjištěných hodnot bylo nasimulováno teoretické maximální a průměrné množství, které může ulpít na povrchu fasád od 1 až do 40 let trvajícím znečištěním.

Tab. č. 6 *Přepočet koncentrace PM_{10}.*

Počet roků	Dávka [$\mu g/ m^3$]	
	Maximální koncentrace PM_{10}	Průměrná koncentrace PM_{10}
1	81	31,86
3	243	96
5	405	159
10	810	319
20	1620	637
40	3240	1275

S ohledem na vnitřní objem zkušební komory (4,276 m^3) osmiúhelníkového tvaru, vyrobené z desek Powerpanell H_2O Fermacell o tloušťce 12,5 mm, byla přepočítána navážka popílku pro zkušební měření.

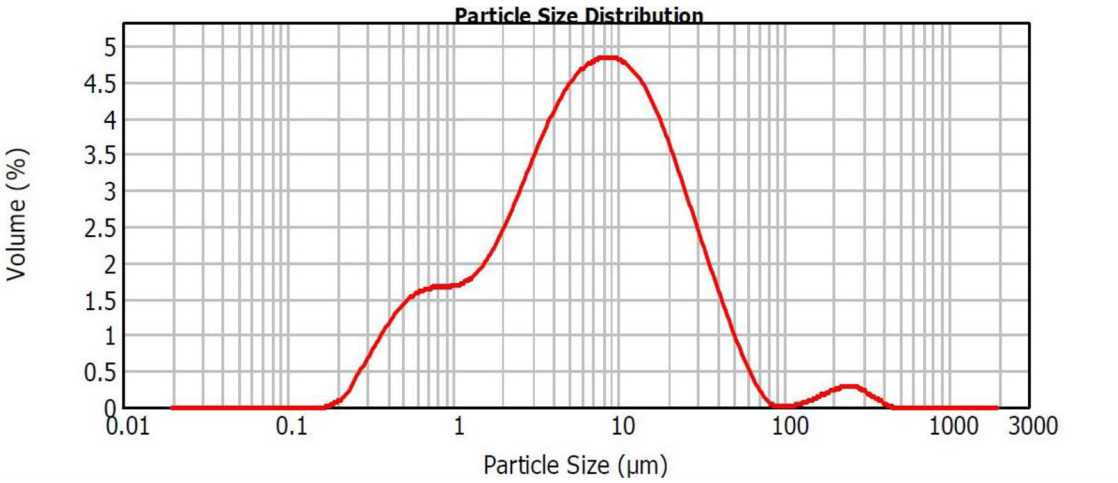
Tab. č. 7 *Přepočet koncentrace PM_{10} pro zkušební komoru.*

Počet roků	Maximální koncentrace PM_{10} [$\mu g/4,276\ m^3$]	Průměrná koncentrace PM_{10} [$\mu g/4,276\ m^3$]
1	346,3	136,2
3	1038,9	410,4
5	1731,5	679,8
10	3463,0	1363,8
20	6926,0	2733,4
40	13851,9	5451,0

2.3.1 Zkušební médium

Jako zkušební médium pro umělé simulování ulpění znečištění na povrchu vzorků byl použit popílek z Třineckých železáren, který již byl využit v diplomové práci Ing. Jakuba Krejčíka. Granulometrie byla měřena na přístroji Mastersizer 2000 ver. 5.6. v centru AdMas. Pomocí sušárny a měření hmotnosti do konstantní hmotnosti při teplotě 103 ± 2 °C, byla zjištěna vlhkost popílku 0,5 %.

Obr. č. 30 Popílek jako zkušební médium. Foto autor.



Graf č. 1: Granulometrie použitého popílku. Zdroj autor.

Tab. č. 8 *Granulometrie použitého popílku*

Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00
0.022	0.00
0.025	0.00
0.028	0.00
0.032	0.00
0.036	0.00
0.040	0.00
0.045	0.00
0.050	0.00
0.056	0.00
0.063	0.00
0.071	0.00
0.080	0.00
0.089	0.00
0.100	0.00
0.112	0.00
0.126	0.00
0.142	

Size (µm)	Volume In %
0.142	0.00
0.159	0.00
0.178	0.04
0.200	0.09
0.224	0.21
0.252	0.36
0.283	0.50
0.317	0.65
0.356	0.79
0.399	0.92
0.448	1.04
0.502	1.12
0.564	1.19
0.632	1.23
0.710	1.25
0.796	1.25
0.893	1.26
1.002	

Size (µm)	Volume In %
1.002	1.27
1.125	1.31
1.262	1.37
1.416	1.47
1.589	1.60
1.783	1.77
2.000	1.95
2.244	2.15
2.518	2.36
2.825	2.57
3.170	2.78
3.557	2.98
3.991	3.15
4.477	3.30
5.024	3.42
5.637	3.51
6.325	3.58
7.096	

Size (µm)	Volume In %
7.096	3.62
7.962	3.64
8.934	3.63
10.024	3.59
11.247	3.52
12.619	3.42
14.159	3.27
15.887	3.09
17.825	2.88
20.000	2.64
22.440	2.39
25.179	2.13
28.251	1.86
31.698	1.60
35.566	1.35
39.905	1.10
44.774	0.87
50.238	

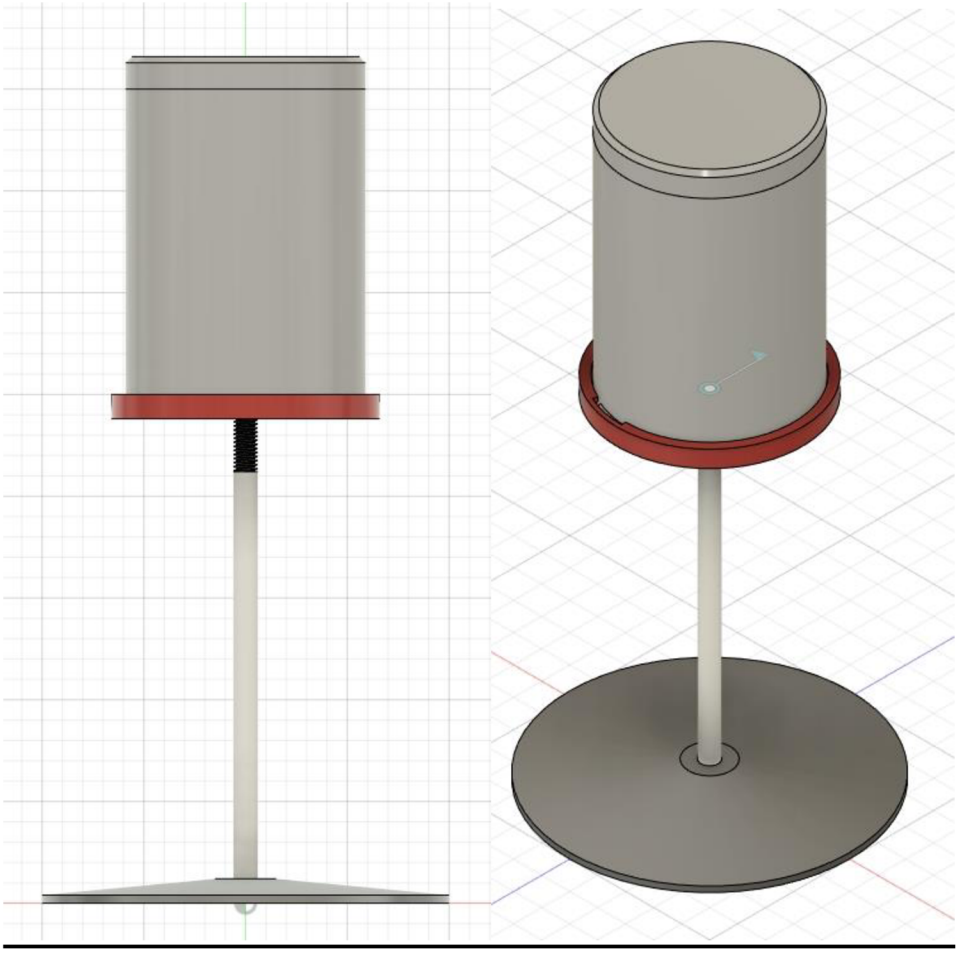
Size (µm)	Volume In %
50.238	0.64
56.368	0.44
63.246	0.26
70.963	0.11
79.621	0.03
89.337	0.01
100.237	0.02
112.468	0.02
126.191	0.05
141.589	0.08
158.866	0.12
178.250	0.16
200.000	0.19
224.404	0.21
251.785	0.21
282.508	0.18
316.979	0.12
355.656	

Size (µm)	Volume In %
355.656	0.08
399.052	0.02
447.744	0.00
502.377	0.00
563.677	0.00
632.456	0.00
709.627	0.00
796.214	0.00
893.367	0.00
1002.374	0.00
1124.683	0.00
1261.915	0.00
1415.892	0.00
1588.656	0.00
1782.502	0.00
2000.000	

Z přiloženého Grafu č. 1 a Tab. č. 8 je zřejmé, že velikost zrn popílku se pohybuje od minimální velikosti 0,178 µm do největší velikosti 399,052 µm.

2.3.2 Dávkovací zařízení č. 1

Pro potřebu rovnoměrného dávkování popílku uvnitř zkušební komory byl vytvořen model dávkovacího zařízení v Autodesk Fusion 360 a následně vytvořeno pomocí 3D tisku na 3D tiskárně.

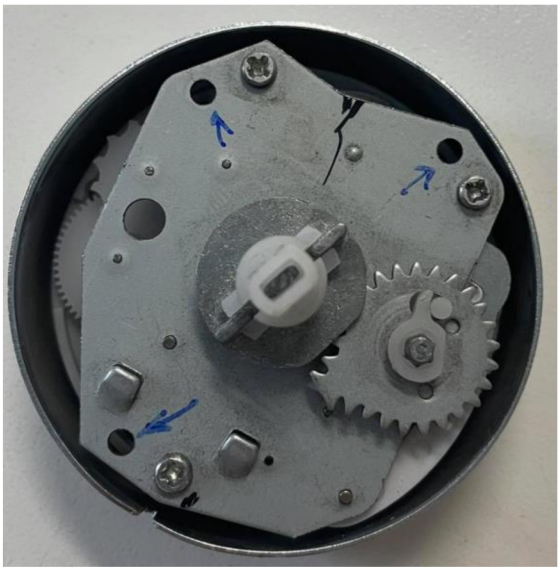


Obr. č. 31 Dávkovací zařízení. Foto autor.

Zkušební dávkovač je složen z podstavy, šroubu, dvou matek, víčka, zásobníku a mechanického zařízení pro posun. Pro pohon bylo použito mechanické zařízení použité v kuchyňské minutce TFA 38.1028.02. Mechanické zařízení bylo upřednostněno před elektrickým z důvodu předejití ovlivnění proudění popílku uvnitř zkušební komory vlivem elektrostatického působení.

Obr. č. 32 Dávkovač popílku Foto autor.

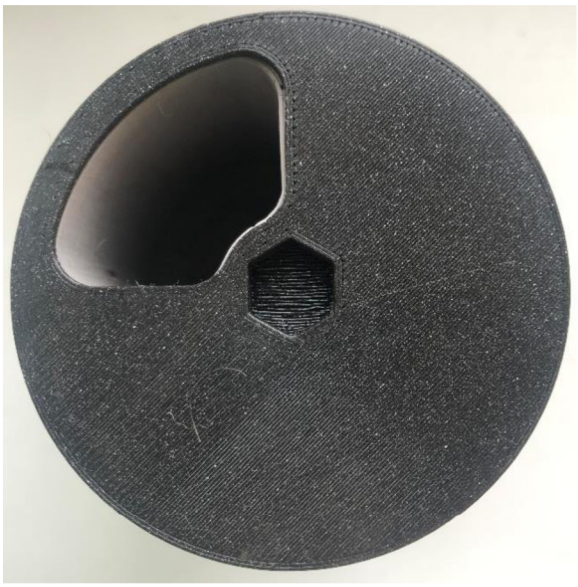
Obr. č. 33 Umístění mechanismu zajišťující pohon. Foto autor.



Obr. č. 34 Detail mechanismu pro pohon. Foto autor.

Obr. č. 35 Zásobník na popílek. Foto autor.

Obr. č. 36 Zásobník na popílek s nasazeným víčkem v startovní pozici. Foto autor.



Obr. č. 37 Zásobník na popílek s nasazeným víčkem v první pozici. Foto autor.

2.3.3 Princip zařízení

Zařízení funguje na principu otáčení zásobníku s třemi dávkovacími komorami. Podstava, spojovací šroub a černé víčko s otvorem je pevně statické. Pomocí otvoru ve víčku propadá rovnoměrně předem nadávkovaný popílek na podstavu zkušebního dávkovače. Zařízení se pokládá na střed zkušební komory. Pohon zásobníku zajišťuje mechanický přístroj umístěný samostatně v horní části šedé nádoby. Pomocí větráku ve zkušební komoře je dále popílek rovnoměrně rozprostřen ve zkušební komoře a následně prouděním vzduchu ulpívá na zkušebních vzorcích.

Během testování zkušebního dávkovače s popílkem bylo zjištěno, že mechanismus použitý pro posun zásobníku, viz Obr. č. 35, je nespolehlivý. Při nadávkování popílku do zásobníku a následném spuštění, docházelo k nepravidelným zastavením. Lze předpokládat, že tento mechanismus je pro účel pohonu dávkovače popílku nevhodný z důvodu nízkého točivého momentu. Mechanismus po vyjmutí z dávkovače a natáhnutí mechanismu nadále fungoval správně.

2.3.4 Dávkovací zařízení č. 2

Kvůli nespolehlivosti mechanismu použitého u dávkovače č. 1 bylo opuštěno od myšlenky použití natahovacího mechanismu a jeho dávkovače umístěného uvnitř zkušební komory. Pro rovnoměrné dávkování popílku do zkušební komory během simulování podmínek znečištění na vzorcích uvnitř komory, byl navrhnut šnekový dopravník umístěný vně na horní desce zkušební komory.

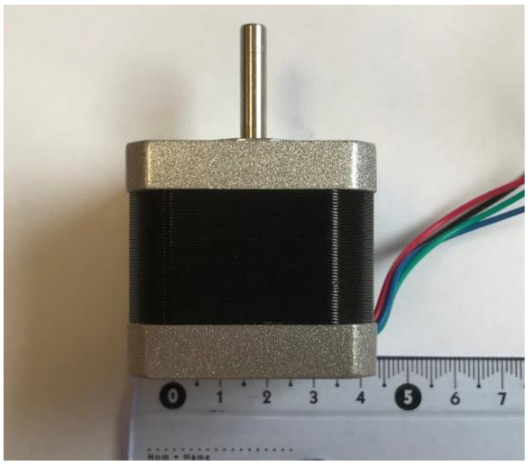
Pro pohon šnekového dopravníku byl použit krokový motor typ Nema 17 a programovatelné manuální ovládání pro krokové motory. Šneková spirála (průměr 15,8 mm) byla namodelována opět, jako předešlý dávkovač, v softwaru Autodesk Fusion 360 a vytištěna na 3D tiskárně. Jako trubice pro šnekový dopravník byla použita trubice z čirého plexiskla (vnější průměr 20 mm, tloušťka stěny 4,2 mm) z důvodu, aby bylo možné sledovat pohyb popílku a správnou funkci dávkování při zapnutí dávkovače.

Obr. č. 38 Manuálně programovatelné ovládání uložené do krabičky. Foto autor.

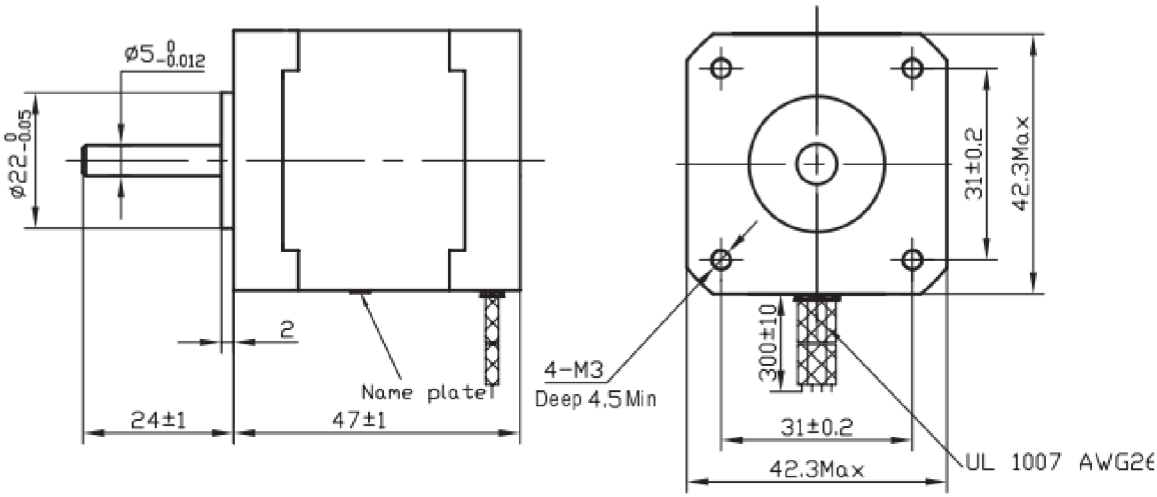
Ovládání umožňuje následující funkce (zleva do prava):

- program 1 až 9 pro uložení nastavení,
- otočení o 1 až 999 °,
- směr otáčení (1 po směru hodinových ručiček, 2 proti směru hodinových ručiček),
- rychlost otáčení (1 – nejrychlejší, 9 – nejpomalejší),
- pauza po otočení v rozmezí 0 až 99 sekund.

Spodní levé tlačítko spouští jednorázově nastavené otáčení. Pravé spodní tlačítko spouští neustále se opakující nastavené otáčení. Diody na levé straně signalizují směr otáčení (horní dioda signalizuje otáčení po směru, spodní dioda proti směru hodinových ručiček).



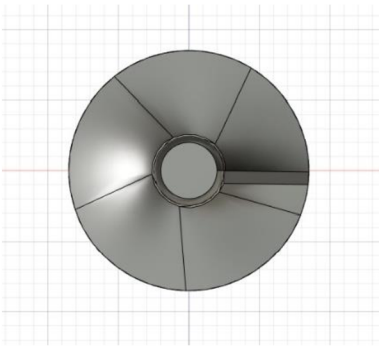
Obr. č. 39 Krokový motor s přírubou typ Nema 17. Foto autor.



Obr. č. 40 Schéma krokového motoru s přírubou typ Nema 17. [27]

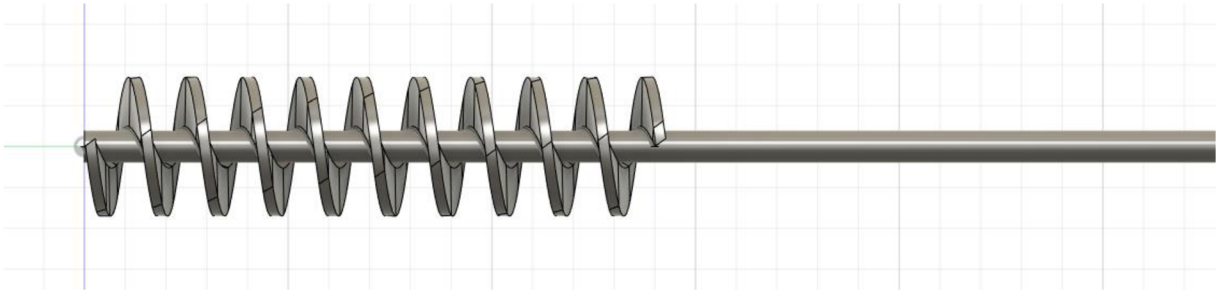
Tab. č. 9 *Parametry krokového motoru Nema 17.[28]*

Optimální napájení	4,2 a 1,5 A na fázi
Točivý moment	0,5 Nm
Kroků na otáčku	200 kroků / 1,8 °krok
Průměr osy	5 mm



Obr. č. 41 Spirála dávkovače. Foto autor.

Obr. č. 42 Spirála dávkovače. Foto autor.



Obr. č. 43 Spirála dávkovače. Foto autor.

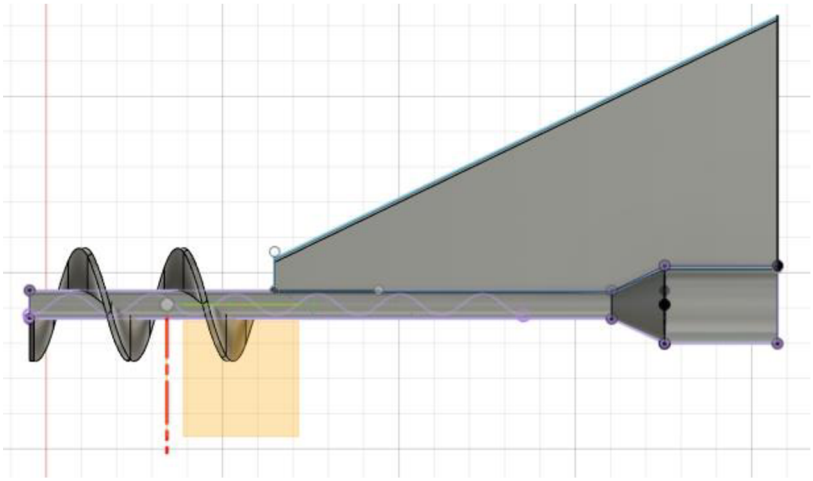
2.3.4.1 První testování šnekového dopravníku

Pro účel testování šnekového dopravníku byla vyrobena sestava z OSB desek a dřeva (viz obr. č. 44). Během prvních testů bylo zjištěno, že popílek v násypce nemá tendenci průběžně se sesypávat do prostoru spirály a docházelo ke shlukování popílku (viz Obr. č. 45).

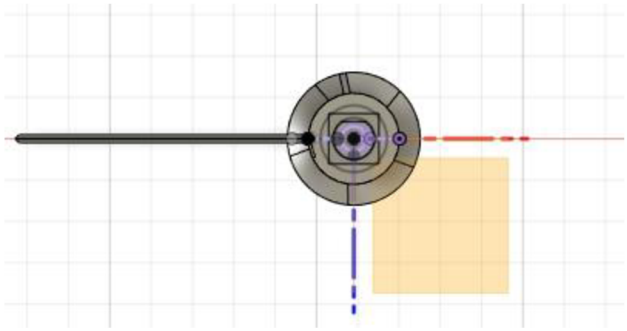
Obr. č. 44 Sestava pro testování šnekového dopravníku. Foto autor.

Obr. č. 45 Soudržnost popílku v násypce. Foto autor.

Za účelem rovnoměrného dávkování popílku do spirály byla namodelována nová spirála s křidélkem, které během otáčení zajišťuje spád popílku do spirály viz Obr. č. 46 a také nová násypka.



Obr. č. 46 Nová spirála s násypkou – řez. Foto autor.



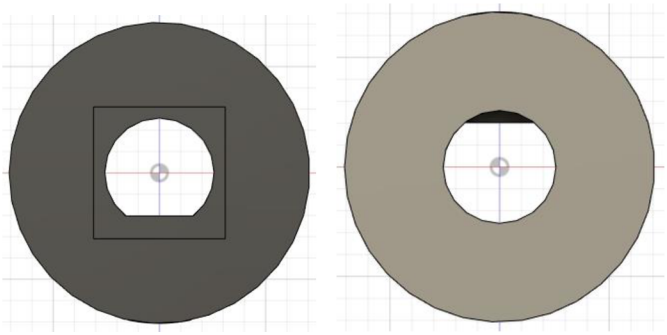
Obr. č. 47 Nová spirála – půdorys. Foto autor.

Obr. č. 48 Nová spirála a násypka. Foto autor.

2.3.4.1 Druhé testování šnekového dopravníku

Pro účel dalšího testování šnekového dopravníku byla použita nová sestava z OSB desky a ohnutého plechu připevněného k OSB desce. V horní části plechu byl umístěn krokový motor typ Nema 17 upevněný pomocí držáku vytvořeného z 3D tisku ve tvaru převráceného „U“ a šroubů. Na hřídel krokového motoru byla napojena spojka vytvořená taktéž z 3D tisku, dále na tuto spojku byla napojená 4 hraná tyč z tažené ocele o velikosti (6 x 6) mm. Na tuto tyč, z opačné strany, byla nasunuta spirála a napevno spojena pomocí tavící pistole. Jak krokový motor, tak i tyč, nebyly natrvalo spojeny se spojkou z důvodu možného rozebrání celého šnekového dopravníku.

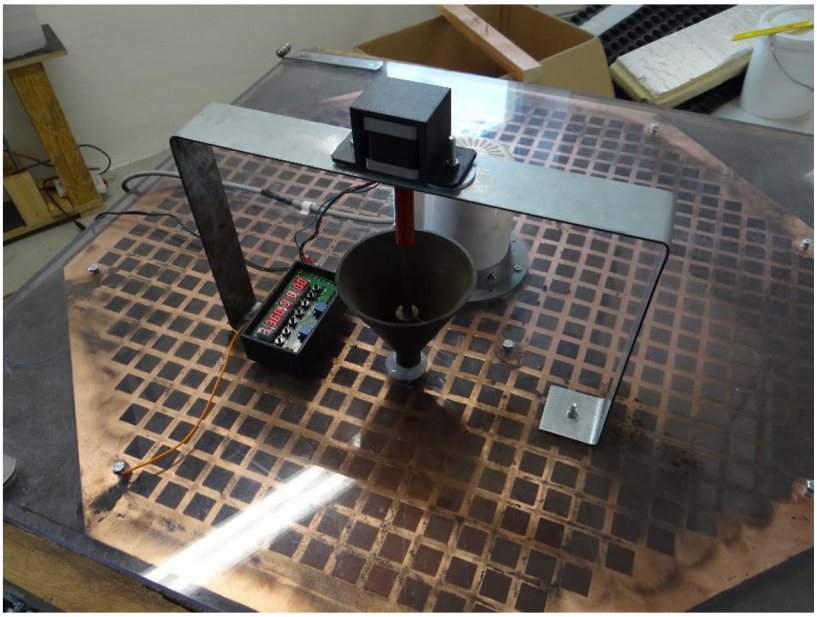
Obr. č. 49 Nová sestava pro druhé testování šnekového dopravníku. Foto autor.



Obr. č. 50 Detail spojky na tyč a krokový motor. Foto autor.

Obr. č. 51 Zkušební komora před namontováním dávkovače č. 2 a Peltiérových článků: Foto autor.

Násypka dávkovače č. 2 byla nasunuta na trubici z plexiskla, která byla umístěna skrz celou tloušťku vrchní desky. Trubice byla umístěna co nejblíže k větráku viz Obr. č. 52 a dále vyvedena pomocí kolene, vytvořeného z 3D tisku, pod úhlem 50 ° pod střed větráku viz Obr. 53, tak aby byl popílek rovnoměrně dávkován.



Obr. č. 52 Namontovaný dávkovač č. 2 na zkušební komoru. Foto autor.

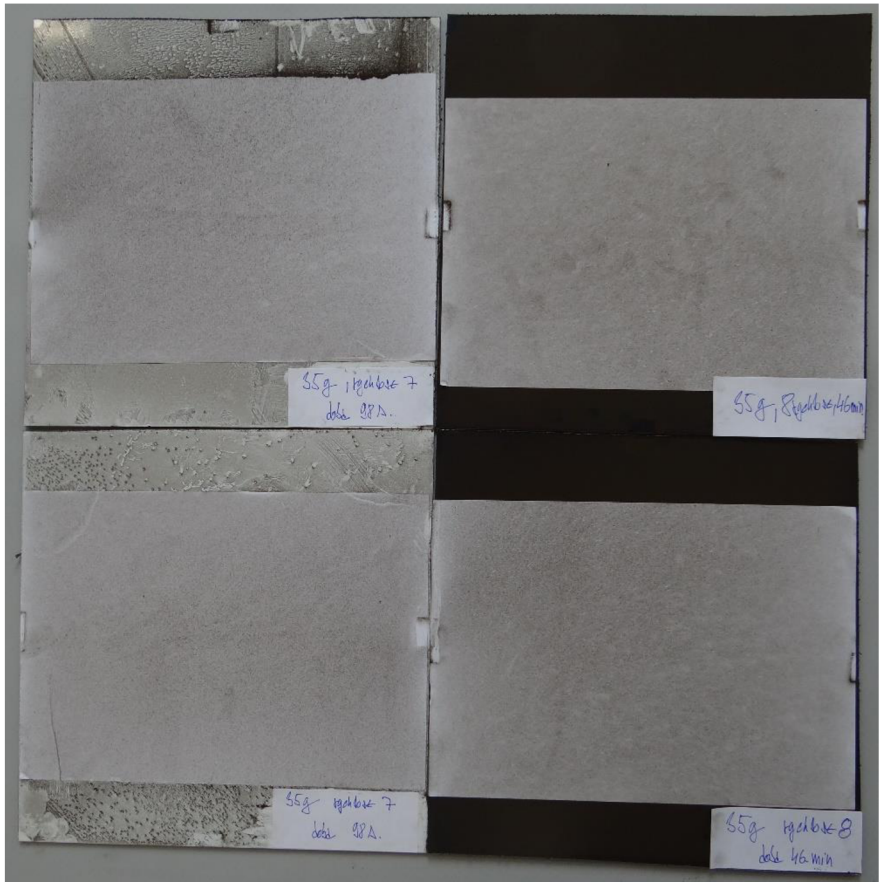
Obr. č. 53 Detail vyvedení dávkovací trubice pod osu větráku. Foto autor.

2.4 Etapa III Simulování umělého znečištění

Před finálním simulování umělého znečištění na vzorcích z pozinkovaného plechu a aplikovaných obou typů omítek, bylo zapotřebí otestovat také, jak významný vliv má doba dávkování popílku na míru ulpění znečištění na povrchu. Z tohoto důvodu byly vyrobeny náhradní 4 vzorky z plechu o totožném rozměru jako dřívější vzorky, to znamená (300 x 300) mm a byly na ně nalepeny bílé papíry formátu A4 s jednou stranou čistou a druhou stranou opatřenou lepidlem.

Testována byla navážka 35 g popílku na dvou rozdílných rychlostech:

- rychlost 7 – doba jedné 360° otáčky trvala 1,5 s; doba dávkování 98 sec,
- rychlost 8 – doba jedné 360° otáčky trvala 14 s; doba dávkování 46 min.



Obr. č. 54 Náhradní testovací vzorky po cyklování. Foto autor.

Bylo zjištěno, že doba, po kterou je průběžně dávkován popílek, má výrazný vliv na rovnoměrné rozprostření popílku po celé ploše testované plochy, což je zřejmé z Obr. č. 54. Na levé straně se nachází vzorky vystavené rychlosti dávkování 7 po celkovou dobu 98 sec. Vzorky na pravé straně byly vystaveny dávkování rychlostí 8 po dobu 46 min.

Díky tímto zjištěním bylo rozhodnuto, aby rychlost na ovládání dávkování popílku byla nastavena na nejpomalejší, to znamená rychlost 9. Jedna 360° otočka pro rychlost 9 trvala 60 s.

Při finálním testování bylo v rámci každého zkušebního cyklu vloženo do zkušební komory celkem 8 vzorků, čili bylo testováno celkem 6 sad vzorků označené jako I až VI. (3 sady s aplikovanou omítkou A1 a 3 sady s aplikovanou omítkou B1). Rozdělení testovacích vzorků pro simulování umělého špinění je uvedeno v Tab. č. 10.

Tab. č. 10*: Rozložení vzorků.*

Typ omítky	Působící efekt
A1	Mechanický
	Elektrostatický
	Elektrostatický
	Chlazení
B1	Mechanický
	Elektrostatický
	Elektrostatický
	Chlazení

Sady I až V byly složeny z 8 vzorků. Pouze sada VI byla složena ze 6 vzorků z důvodu zachování referenčních vzorků (pro každý typ omítky 1 referenční vzorek), které byly použity pro měření reflexním spektrofotometrem Konica Minolta CM-600d. Sada číslo VI byla upravena podle Tab. č. 11.

Tab. č. 11 *Rozložení sady VI.*

Typ omítky	Působící efekt
A1	Mechanický
	Elektrostatický
	Chlazení
B1	Mechanický
	Elektrostatický
	Chlazení

Pro každý cyklus testování byly umístěny 4 vzorky od každé omítky tak, aby vzorky, které byly vystaveny totožnému efekty, byly naproti sobě. Vzorky označené jako „Elektrostatický efekt“ byly vystaveny napětí 1000 V pro vyhodnocení elektrostatického vlivu na ulpění nečistot na povrchu. Vzorky „Chlazení“, které byly umístěny na Peltiérovy články, byly chlazeny na 13,5 °C z důvodu testování vlivu termoprecipitace na ulpění nečistot taktéž na povrchu omítek.

Sada I byla otestována jako první. Byly nadávkovány 2 g popílku a zapnuté dávkování spolu s větrákem. Po vyprázdnění násypky a spirály bylo simulování znečištění ukončeno a odpojeny všechny napájecí kabely pro zkušební komoru a dávkovač. Poté byly všechny vzorky vyjmuty z komory.

Zbylý popílek v komoře a dávkovači byl odstraněn pomocí vysavače, smetáčku a stlačeným vzduchem ve spreji.

Před následujícím cyklem byly vizuálně porovnány vzorky testované na mechanické ulpění s experimentální budovou v Brně společnosti DEK, a.s. oddělení výzkum a vývoj, na které jsou od srpna 2017 vystaveny omítky dlouhodobému přirozenému znečištění. Jako porovnávací stěna byla vybrána ta, která se vizuálně jevila jako nejvíc znečištěná. Vedlejší stěna (levá strana) jevila míru znečištění naopak nejmenší.

Obr. č. 55 Vzorek IA1 Mechanický efe. Foto autor.

Obr. č. 56 Vzorek IB1 Mechanický efe. Foto autor

Obr. č. 57 Vzorek IA1 Mechanický efekt. – detail. Foto autor.

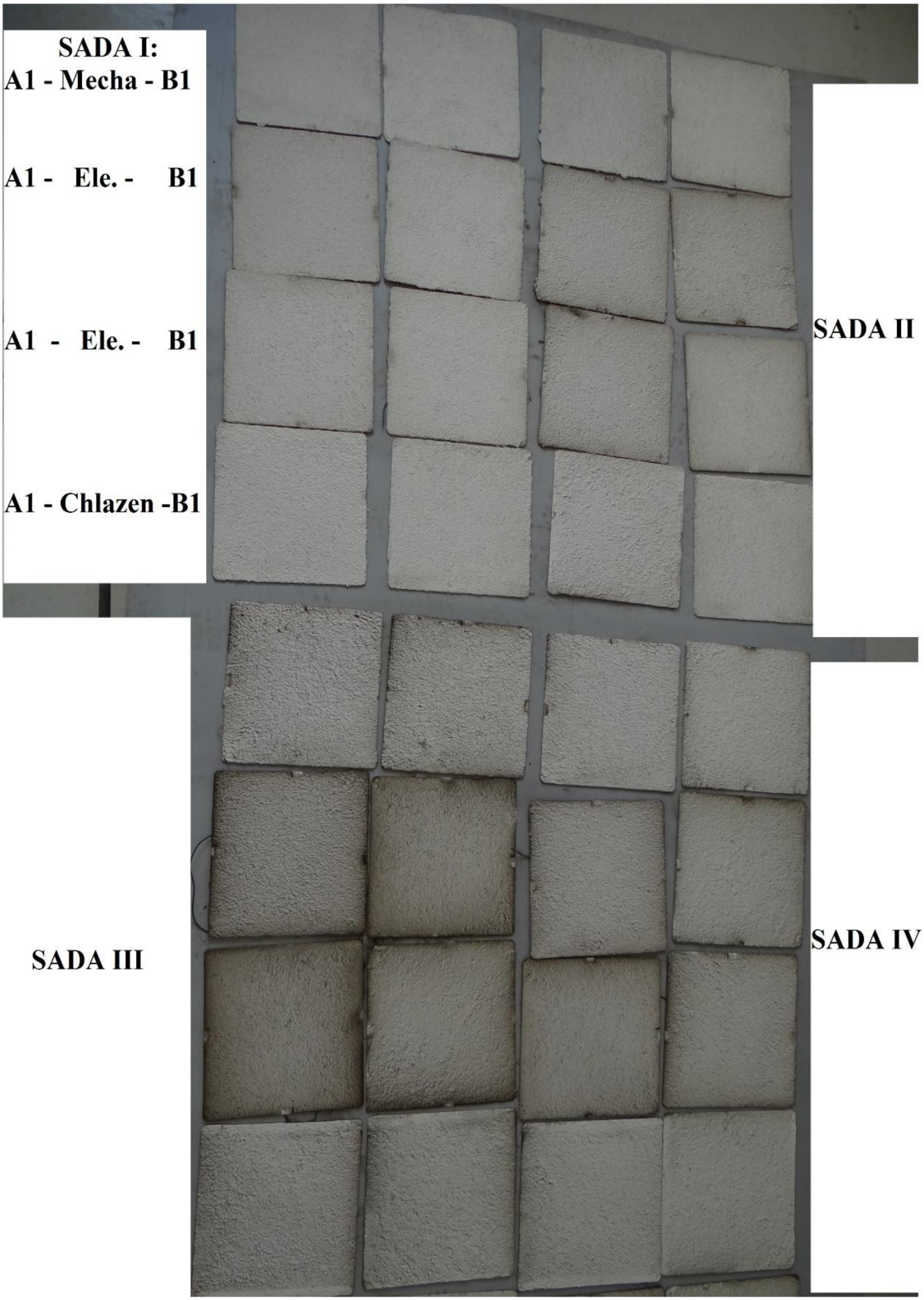
Obr. č. 58 Vzorek IB1 Mechanický efekt – detail. Foto autor

Pomocí uvedených obrázků č. 55, 56, 57 a 58 je patrné, že simulování znečištění povrchu testovaných vzorků se velmi přibližuje realitě znečištění, které je na experimentální budově. Pro sady II, II a IV se postupně navyšovaly navážky popílku do 20 g, kde již bylo znečištění až příliš intenzivní a byly zvoleny navážky popílku 4 g pro sadu V a 8 g popílku pro sadu VI.

Tab. č. 12 *: Rozložení vzorků.*

Cyklus /sada	Navážka popílku [g]	Rychlost	Úhel otočení spirály [°]	Doba [min]
I	2	9	360	9
II	6			23
III	10			50
IV	20			60
V	4			15
VI	8			38

Simulování umělého špinění popílkem probíhalo v prostředí s teplotou 20,5 °C a relativní vlhkostí 51,6 %. Přesnost vážení byla na 0,1 g.



Obr. č. 59 Sady I až IV po simulování znečištění. Foto autor.

Vzorky sad II až V byly seřazeny identickým způsobem jako sestava I viz. Obr. č. 59.

Obr. č. 60 Sada V a VI po simulování znečištění. Foto autor.

2.5 Etapa IV Vyhodnocení a výsledky

Pomocí reflexního spektrofotometru Konica Minolta CM-600d byly v laboratořích Fakulty stavební VUT vyhodnoceny všechny vzorky, na kterých se simulovalo umělé špinění popílkem ve zkušební komoře. Na každém vzorku bylo prováděno dohromady 5 měření na stejných místech pomocí šablony viz. Obr. č. 61.

Obr. č. 61 Šablona pro vyhodnocení spektrofotometrem. Foto autor.

Hodnoty zjištěné měřením jsou uvedené v následující tabulce včetně výsledné vypočítané hodnoty.

Tab. č. 13 *Naměřené a vypočítané hodnoty sad I až IV*

Sada	Označení vzorku	L*	a*	b*	ΔE^*_{ab}	Průměr ΔE^*_{ab} pro "Ele"
I	A1 Mecha	84,26	0,18	5,50	1,15	
	A1 Ele	82,43	0,15	5,56	0,75	1,34
	A1 Ele	81,36	0,40	6,00	1,93	
	A1 Chlazen	82,12	0,24	5,50	1,04	-
	B1 Mecha	85,60	0,24	6,08	0,66	-
	B1 Ele	84,44	0,02	6,06	0,53	0,45
	B1 Ele	84,77	0,07	6,35	0,37	
	B1 Chlazen	84,95	0,14	6,29	0,25	-
II	A1 Mecha	80,94	0,24	5,83	2,26	-
	A1 Ele	79,60	0,48	6,14	3,65	3,43
	A1 Ele	80,09	0,50	6,26	3,21	
	A1 Chlazen	80,48	0,40	5,67	2,69	-
	B1 Mecha	84,52	0,23	6,20	0,45	-
	B1 Ele	81,75	0,29	6,57	3,23	3,97
	B1 Ele	80,34	0,46	7,06	4,72	
	B1 Chlazen	83,90	0,10	6,00	1,05	-
III	A1 Mecha	77,09	0,65	6,58	6,20	-
	A1 Ele	78,01	0,65	6,48	5,28	5,14
	A1 Ele	78,31	0,55	6,58	5,01	
	A1 Chlazen	80,29	0,36	5,79	2,89	-
	B1 Mecha	78,62	0,55	7,42	6,48	-
	B1 Ele	79,76	0,56	7,25	5,33	6,05
	B1 Ele	78,25	0,46	7,07	6,77	
	B1 Chlazen	81,23	0,42	6,26	3,72	-
IV	A1 Mecha	75,49	0,87	6,51	7,77	-
	A1 Ele	69,38	1,06	7,32	13,93	13,76
	A1 Ele	69,71	0,97	7,23	13,59	
	A1 Chlazen	79,47	0,41	5,86	3,71	-
	B1 Mecha	80,01	0,50	6,99	5,03	-
	B1 Ele	73,64	0,93	7,90	11,47	11,14
	B1 Ele	74,30	0,65	7,88	10,81	
	B1 Chlazen	78,93	0,46	6,64	6,04	-

Tab. č. 14 *Naměřené a vypočítané hodnoty pro sady V a VI.*

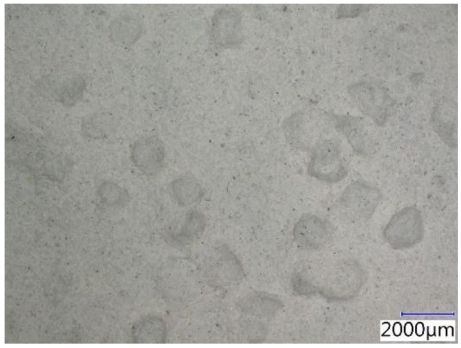
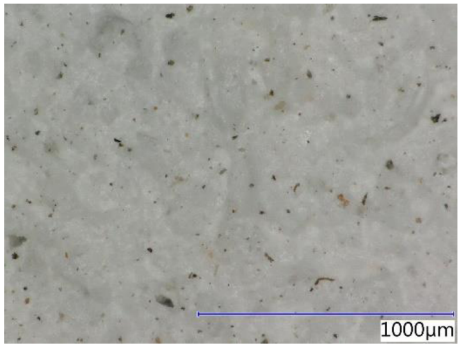
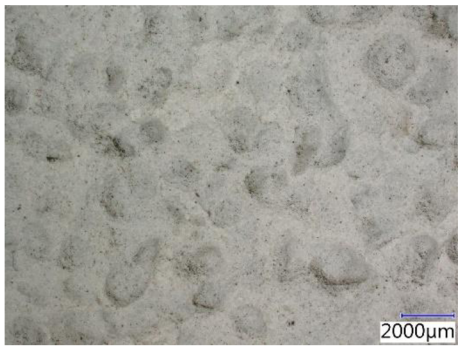
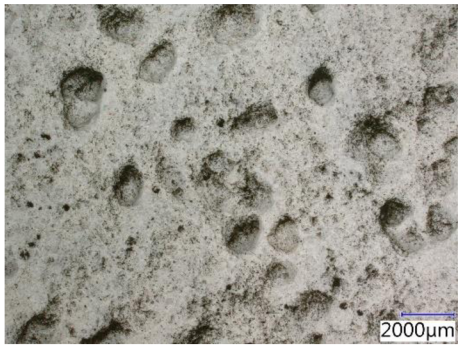
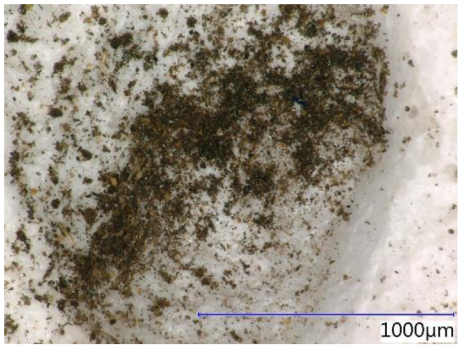
Sada	Označení vzorku	L*	a*	b*	ΔE^*_{ab}	Průměr ΔE^*_{ab} pro "Ele"
V	A1 Mecha	85,00	-0,09	5,56	1,90	-
	A1 Ele	82,82	0,39	6,19	0,98	1,39
	A1 Ele	81,78	0,50	6,43	1,80	
	A1 Chlazen	85,80	0,25	5,61	2,69	-
	B1 Mecha	86,65	0,14	6,34	1,74	-
	B1 Ele	84,11	0,24	6,44	0,92	0,74
	B1 Ele	84,89	0,36	6,58	0,55	
	B1 Chlazen	86,68	0,09	6,06	1,74	-
VI	A1 Mecha	78,47	0,58	6,37	4,80	
	A1 Ele	77,61	0,85	7,16	5,87	
	A1 Chlazen	80,74	0,51	6,31	2,63	
	B1 Mecha	82,26	0,33	6,96	2,83	
	B1 Ele	81,07	0,57	7,35	4,10	
	B1 Chlazen	84,69	0,20	6,24	0,31	

Tab. č. 15 *Naměřené hodnoty referenčních vzorků.*

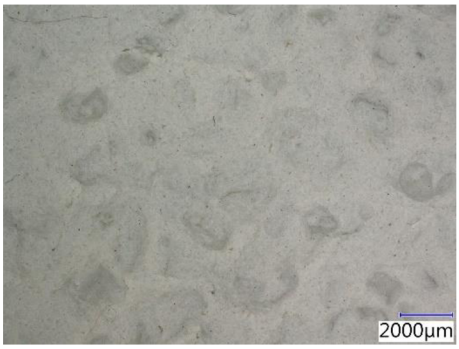
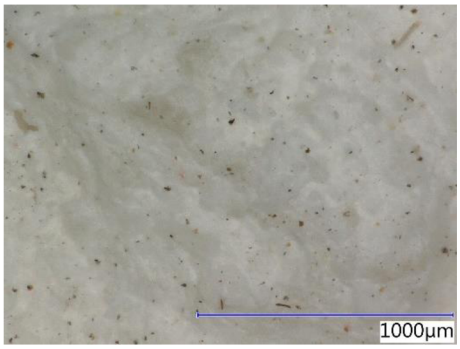
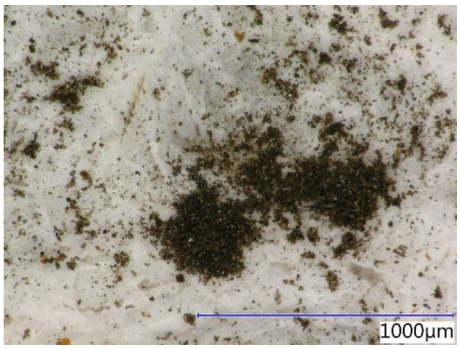
Vzorek	L*	a*	b*
A1 Reference	83,13	0,11	5,3
B1 Reference	84,94	0,21	6,05

U vybraných vzorků bylo následně provedeno mikroskopické snímkování pomocí optického mikroskopu, a to při zvětšení 20 × a 200 ×. Použit byl optický mikroskop Keyence VHX-950F na Fakultě stavební VUT. Snímkovány byly referenční vzorky a vzorky z I. a IV. sady, které byly vystaveny elektrostatickému působení. Fotografie jsou uvedeny níže v Tab. č. 17 a 18.

Tab. č. 17 *Výsledky mikroskopického snímkování vzorků s omítkou A1*

Popis vzorku	Snímek z optického mikroskopu, zvětšení 20 ×	Snímek z optického mikroskopu, zvětšení 200 ×
A1 – referenční vzorek		
A1 – I. sada, elektrostatické působení		
A1 – IV. sada, elektrostatické působení		

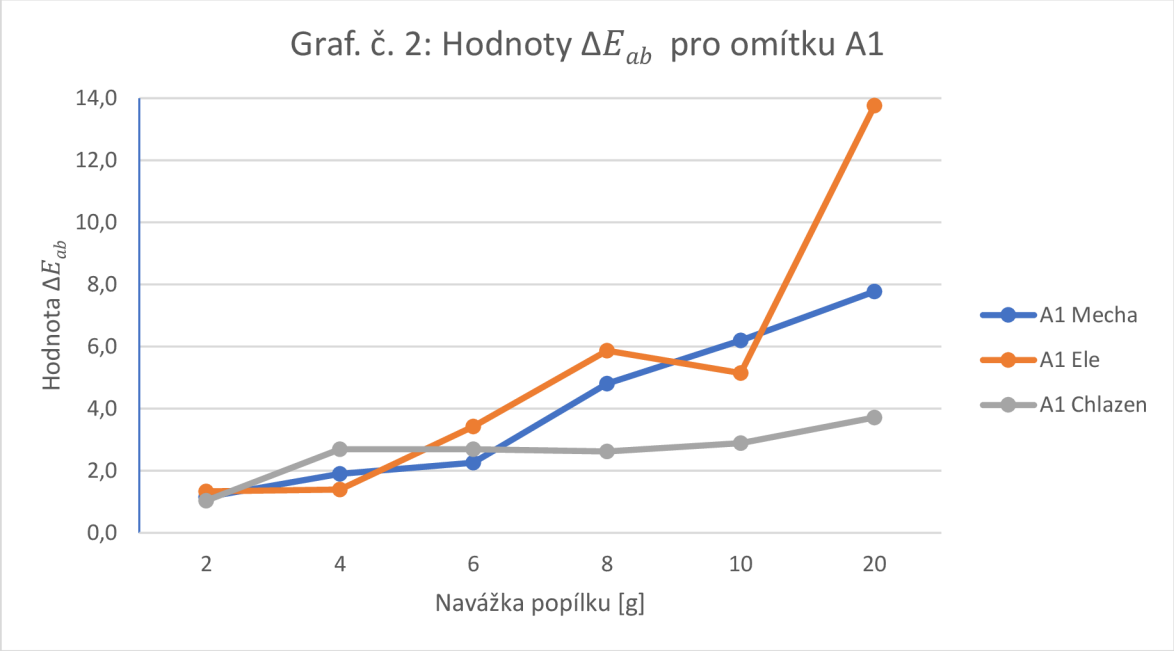
Tab. č. 18 *Výsledky mikroskopického snímkování vzorků s omítkou B1*

Popis vzorku	Snímek z optického mikroskopu, zvětšení 20 ×	Snímek z optického mikroskopu, zvětšení 200 ×
B1 – referenční vzorek		
B1 – I. sada, elektrostatické působení		
B1 – IV. sada, elektrostatické působení		

2.6 Diskuse výsledků

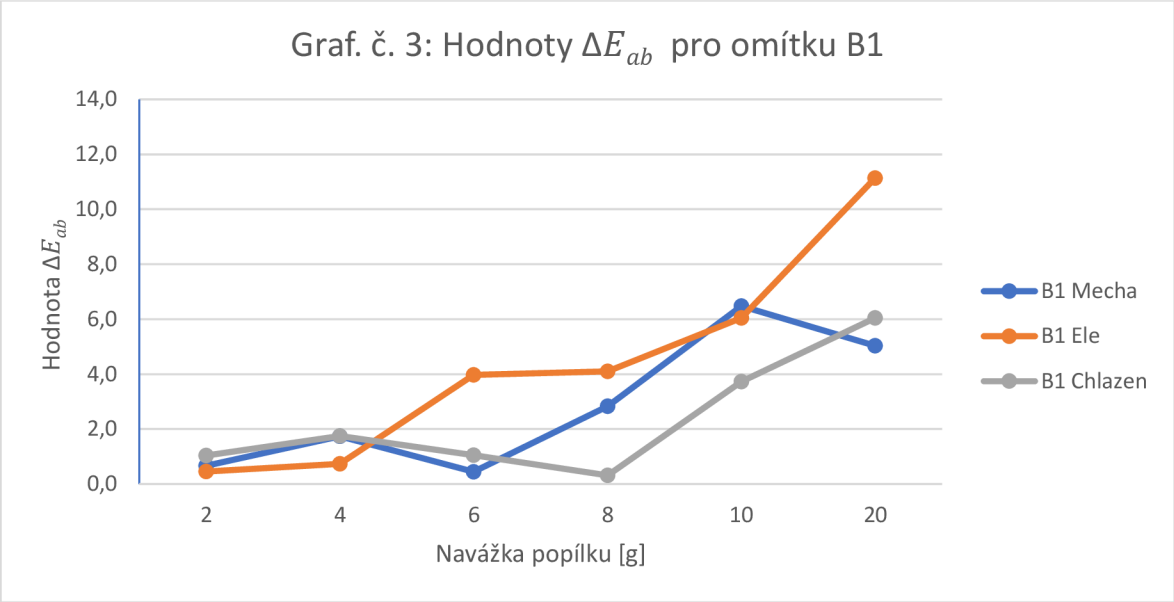
Pomocí měření vzorků vystavených umělému špinění reflexním spektrofotometrem Konica Minolta CM-600d byly naměřeny hodnoty L*, a*, b* a následně vypočítány hodnoty ΔE^*_{ab} v prostoru CIELAB (L*a*b). Škála ΔE^*_{ab} určuje rozdíl mezi barvami. Nejvyšší hodnota ΔE^*_{ab} je zjištěna u sady IV A1 (pastovitá omítka), a to konkrétně hodnota 13,76. Tato hodnota byla zjištěna jako průměr hodnot vypočítaných u dvou vzorků pod elektrostatickým efektem při napětí 1000 V. Toto zjištění bylo očekáváno, jelikož se jednalo o nejvyšší použitou navážku (20 g) popílku pro simulování umělého špinění vzorků. Omítka B1 (s fotokatalytickým efektem) má hodnotu ΔE^*_{ab} 11,14 (průměr ze dvou vzorků pod elektrostatickým efektem při napětí 1000 V), což je hodnota téměř o 20 % nižší.

Z naměřených a vypočítaných hodnot je zřejmé, že největší vliv na ulpívání popílku na povrch omítek má efekt elektrostatický. Nejvyšší zjištěné hodnoty byly u sad vzorků: IA1, IIA1, IIB1, IVA1, IVB1, VIA1 a VIB1 (celkově 7). Druhý největší vliv má mechanické ulpívání popílku na povrchu omítek, a to u sad vzorků: IB1, IIIA1, IIIB1 (celkově 3). U vzorků, které byly chlazeny a tím pádem testovány na vliv termoprecipitace, byly zjištěny pouze dvě nejvyšší hodnoty oproti ostatním, a to u sad vzorků VA1. SadaVB1 měla pro vliv mechanický i chlazený totožnou hodnotu 1,74.



Se zvyšující se navážkou popílku, viz Graf. č. 2, je patrný narůstající trend (zejména u vlivu elektrostatického a mechanického) hodnoty ΔE^*_{ab} pro všechny tři testované vlivy podmínek uložení vzorků v testovací komoře. Pokles je patrný pouze u navážky 10 g popílku. Tento pokles byl způsoben pravděpodobně nepřesností během vyhodnocení spektrofotometrem.

Nižší hodnota ΔE^*_{ab} znamená menší barevní rozdíl oproti referenčnímu vzorku stejného typu omítky a tím pádem také menší míru ulpění znečištění na povrchu testované omítky. Velmi pozvolný nárůst hodnoty ΔE_{ab} je u chlazených vzorků, na kterých byl testován vliv termoprecipitace . I přes 10x větší navážku popílku (2 a 20 g) byl nárůst hodnoty ΔE^*_{ab} pro tyto navážky pouze 2,67. Z těchto hodnot lze usuzovat, že termoprecipitace má nejmenší vliv na míru ulpění nečistot na povrchu omítky A1.



Podobně jako u grafu č. 2, lze pozorovat u grafu č. 3 narůstající trend hodnoty ΔE^*_{ab} se zvyšující se navážkou popílku během simulování umělého znečištění. Oproti omítce A1, omítka B1 má nižší hodnoty ΔE^*_{ab} u všech sledovaných vlivů.

Tab. č. 19 *Průměrné hodnoty* ΔE^*_{ab}

Typ omítky	Průměrná hodnota ΔE^*_{ab}
A1	4,17
B1	3,40

Rozdíl průměrných hodnot všech vzorků ΔE^*_{ab} viz Tab. č. 19 omítky A1 a B1 činí 0,77, což odpovídá rozdílu 18,47 %. Nižší hodnota ΔE^*_{ab} znamená menší barevný rozdíl oproti referenčnímu vzorku stejného typu omítky a tím pádem také menší míru ulpění znečištění na povrchu testované omítky. Na rozdíl od výsledků diplomové práce Ing. Jakuba Krejčíka byly tedy díky využití spektrofotometrického měření a následnému výpočtu barevné odchylky ΔE^*_{ab} zjištěny rozdíly v míře zašpinění způsobené nejen podmínkami uložení v testovací komoře (princip elektrostatický, mechanický a termoprecipitační), ale typem omítky. S ohledem na dosažené výsledky by bylo vhodné

provádět spektrofotometrem více měření na jednom vzorku, například zvýšit počet měřených míst na jednom vzorku z pěti na deset.

Další vývoj a zdokonalení simulátoru umělého zašpinění, který byl proveden v rámci této DP vyřešil problémy související s rovnoměrností dávkování popílku během zkušebního cyklu. Dále bylo navrženo a následně testováno šest zkušebních cyklů, které prokázaly použitelnost optimalizované metody umělého zašpinění omítek.

2.7 Závěr

V rámci teoretické části diplomové práce byly popsány druhy omítek, které byly použity v praktické části, dále faktory způsobující špinění fasád a jejich vliv na fasády.

Praktická část diplomové práce navazuje na diplomovou práci Ing. Jakuba Krejčíka z roku 2018. Byla navrhnuta optimalizace původní metodiky simulování znečištění ve zkušební komoře pomocí rovnoměrného dávkování zkušebního média (popílek z třineckých železáren). Původní metodika dávkování popílku do zkušební komory byla založena na nasypání testované navážky popílku na dno zkušební komory a následném spuštění simulování umělého znečištění na povrchu testovaných vzorků. Tento způsob dávkování nebyl vhodný z důvodu nerovnoměrného rozprostření popílku v celém vnitřním objemu zkušební komory. Proto bylo zapotřebí dosáhnout rovnoměrného postupného dávkování popílku uvnitř zkušební komory v průběhu testovacího cyklu simulující umělého znečištění.

Pro tyto potřeby byl navrhnut dávkovač č. 1. Dávkovač č. 1 se skládal ze dvou základních částí, víčka a otočného válce s dávkovacími komorami. Víčko bylo pevně spojeno s podstavou dávkovače pomocí šroubu a dvou matic. Otočný válec s dávkovacími komorami byl nasunut do drážky víčka. Během otáčení válce propadával popílek otvorem ve víčku. Avšak z důvodu nespolehlivosti dávkovače, kdy docházelo k nepravidelným zastavením, bylo od tohoto dávkovače upuštěno a byl navrhnut nový způsob dávkování popílku do zkušební komory.

Dávkovač č. 2 byl navrhnut jako vertikální šnekový dopravník umístěný na horní desce zkušební komory. Pomocí násypky a spirály, která byla vsunuta do násypky, bylo možné rovnoměrně dávkovat popílek skrz vyvedenou trubici z plexiskla do vnitřního prostoru zkušební komory pod osu větráku. Pohon spirály zajišťoval krokový motor ovládaný pomocí manuálně programovatelného ovládání určeného právě pro krokové motory. Od prvotních testování šnekového dopravníku docházelo ke postupnému vývoji a zdokonalování celého dávkovače č. 2 tak, aby bylo docíleno co nejvíce rovnoměrného dávkování popílku do zkušební komory. Například byla upravena spirála tak, aby byla minimální vůle spirály vůči násypce a trubici z plexiskla. Dávkovač č. 2 byl následně namontován na horní desku zkušební komory.

Před testováním vzorků z pozinkovaných plechů a na nich aplikovaných omítek, bylo otestováno, jak velký vliv má rychlost a tím pádem i doba dávkování popílku, na náhradní vzorky s identickými rozměry jako vzorky z pozinkovaného plechu. Jako náhrada omítek byly použity bílé papíry formátu A4 přilepené na náhradní vzorky.

Bylo zjištěno, že rychlost a doba dávkování popílku v průběhu umělého špinění, má velký vliv na rovnoměrné ulpění znečištění po celkové ploše testovaných vzorků. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že se bude dávkovat popílek nejmenší možnou rychlostí, kterou umožňuje manuálně programovatelné ovládání pro krokový motor.

První sada s označením I byla testována na umělé špinění s navážkou popílku 2 g. Vzorky, které byly vystaveny pouze mechanickému ulpění znečištění na povrchu obou druhů omítek, byly porovnány s omítkami aplikovanými na experimentální budově ve firmě DEK a.s. v Brně. Na této budově je od roku 2017 dlouhodobě testováno ulpívání znečištění na povrchu omítek v reálném prostředí. Pro další testované sady II až IV byla navýšena navážka popílku až do 20 g. (sada II – navážka 6 g, sada III – navážka 10 g, sada IV – navážka 20 g). Pro zbývající sady V a VI byly zvoleny navážky 4 g a 8 g popílku, protože znečištění z předešlé navážky 20 g popílku bylo již příliš intenzivní a nejevilo se jako dosažitelné v reálném prostředí. Jako vhodné lze označit navážky popílku do 10 g, jelikož znečištění ulpěné na povrchu testovaných vzorků pro tyto navážky popílku bylo na základě vizuálního hodnocení porovnatelné s reálným znečištěním na povrchu omítek.

Vzorky všech testovacích sad a dva referenční byly následně v laboratořích Fakulty stavební VUT vyhodnoceny pomocí spektrofotometru a u vybraných vzorků bylo provedeno snímkování optickým mikroskopem při zvětšení 20x a 200x.

Pomocí naměřených a vypočítaných hodnot uvedených v kapitole 2.6 Diskuze výsledků, lze konstatovat, že byl pozorován vliv použitého typu omítky na dosaženou míru znečištění, ale tento fakt by bylo vhodné potvrdit dalšími experimenty. Dosažené výsledky prokázaly, že největší vliv na ulpění popílku na testovaných vzorcích mělo elektrostatické působení. Naopak vliv ulpění znečištění na povrchu omítek termoprecipitací byl vyhodnocen jako nejmenší.

Doporučuji se této problematice nadále věnovat. Je možné stávající metodiku dále optimalizovat pro získání dalších informací a poznatků. V rámci navazujícího vývoje by bylo vhodné zaměřit pozornost na i na jiné hodnoty přivedeného napětí na testované vzorky, dále větší množství testovaných sad a větší množství vyhodnocení spektrofotometrem pro jednotlivé vzorky.

3 Zdroje:

[1] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. *Omítky: Chemické a technologické vlastnosti*. Praha, 2002. ISBN 80-86657-00-0.

[2] Lokální topeniště. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/lokalni_topeniste

[3] *BENZO[A]PYREN* [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/17groc/gr17cz/IV2_BaP_CZ.html

[4] Nedokonalé spalování. In: *Energetika CVUT* [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/VTK-pr6-1.pdf

[5] Lokální topeniště. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/lokalni_topeniste

[6] Doprava a veřejné zdraví. *Evropská agentura pro* [online]. 2016 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://www.eea.europa.eu/cs/signaly/signaly-2016/clanky/doprava-a-verejne-zdravi

[7] *SNIŽOVÁNÍ EMISÍ NOx* [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/snizovem_5.html

[8] ROVNANÍKOVÁ Pavla a ŽIŽKOVÁ Nikol, *Ekologie ve stavebnictví – studijní opora,* Brno: VUT, FAST, 2009, 207 s.

[9] BRZEZINA, Jáchym. Není ozon, jako ozon. *ČHMÚ Brno* [online]. 2018 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://chmibrno.org/blog/2018/08/01/neni-ozon-jako-ozon/

[10] HARTMANN, Dennis L., John M. WALLACE, Varavut LIMPASUVAN, David W. J. THOMPSON a James R. HOLTON. *Can ozone depletion and global warming interact to produce rapid climate change?* [online]. 2000, , 6 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1073/pnas.97.4.1412

[11] PETRLÍK, RNDr. Jindřich, Ing. Petr VÁLEK a Ing. Milan HAVEL. *Polétavý prach - PM* [online]. [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://arnika.org/poletavy-prach-pm10

[12] Příloha 1 - metody měření emise. In: *Technické služby ochrany ovzduší Praha, a.s.* [online]. 2010 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: http://www.teso.cz/adm/data/files/others/priloha-1-metody-mereni-emise-3.pdf

[13] PARNHAM, Phil. *Prevention of Premature Staining of New Buildings*. Londýn: E & FN SPON, 1997. ISBN 0-203-47391-4

[14] BUREŠ, Petr. *Systém a evoluce vyšších rostlin: Mechorosty* [online]. , 152 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://www.sci.muni.cz/botany/bures/vysrost/03_bryophytes.pdf

[15] *Elektrostatické pole: Vznik a zobrazení elektrostatického pole* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: http://old.spsemoh.cz/vyuka/zae/el5.htm

[16] Atmosférická elektřina [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://www.ian.cz/archiv/data/ian1/iannew/173_p.htm

[17] KAULICH, Ing. Viktor Kaulich. *Termoprecipitace a její vliv na kvalitu povrchů fasád* [online]. 2010 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: https://atelier-dek.cz/termoprecipitace-jeji-vliv-na-kvalitu-povrchu-fasad-627

[18] SKŘEHOT, Petr. *AEROSOLY* [online]. , 85 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: http://www.portalbozp.cz/wp-content/uploads/2014/09/Prevence-nehod-a-havarii_1.dil_Kapitola-3.pdf

[19] SPEVÁKOVÁ, Šárka a Vladimír KUNZ. *Světlem proti špíně: Oxid titaničitý* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://www.ceskatelevize.cz/porady/10121359557-port/418-svetlem-proti-spine/video/

[20] MARTÍNKOVÁ, Lenka. *POKROČILÉ OXIDAČNÍ PROCESY: FOTOKATALÝZA*. Hradec Králové, 2017. Bakalářská práce. UNIVERZITA KARLOVA FARMACEUTICKÁ FAKULTA V HRADCI KRÁLOVÉ KATEDRA ANALYTICKÉ CHEMIE. Vedoucí práce PharmDr. Lucie Chocholoušová Havlíková, Ph.D.

[21] MOZOLA, Juraj, Petr GADAS, Vladimír HRAZDIL a Pavlína RADKOVÁ. *Anatas, brookit a rutil z pegmatitu u Bobrůvky, strážecké moldanubikum, Česká republika*. 2017. Ústav geologických věd, Masarykova Univerzita.

[22] *Oxidy a hydroxidy* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_7_5_oxidy/kap_7_5_oxidy.htm#7.5.2.5.

[23] *Optické metody* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=52959

[24] BEETSMA, Jochum. *The CIELAB L*a*b* System – the Method to Quantify Colors of Coatings: The CIELAB Color Space* [online]. In: . 2020 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://knowledge.ulprospector.com/10780/pc-the-cielab-lab-system-the-method-to-quantify-colors-of-coatings/

[25] *Weberpas silikon* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://www.cz.weber/fasada-domu/tenkovrstve-pastovite-omitky/weberpas-silikon

[26] *Weberpas extraClean active* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://www.cz.weber/fasada-domu/tenkovrstve-pastovite-omitky/weberpas-extraclean-active

[27] *Nema 17 stepper motor* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://components101.com/motors/nema17-stepper-motor

[28] *Krokový motor s přírubou Nema17, 0.50Nm, 40mm, RepRap 3D* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: http://www.jprint3d.cz/e-shop/dily-reprap/krokovy-motor-s-pririubou-nema17-0-44nm-typ-a

[29] *Jak správně namíchat* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://www.stavebni-vzdelani.cz/spravne-michani-malty/

[30] *Typy válečkovaných pastovitých omítek* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/14964-potrebujete-se-zbavit-trhlin-na-stenach-vyzkousejte-valeckovane-pastovite-omitky-cemroll

[31] SOLAŘÍKOVÁ, Ivana. *Na vesnicích se dýchá hůř než v Brně, můžou za to lokální topeniště Zdroj: https://www.idnes.cz/brno/zpravy/ovzdusi-brno-vesnice-znecisteni.A190114_093407_brno-zpravy_vh* [online]. 2019 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/brno/zpravy/ovzdusi-brno-vesnice-znecisteni.A190114_093407_brno-zpravy_vh

[32] *Benzo(a)pyren* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Benzo(a)pyren

[33] *Doprava a veřejné zdraví* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://www.eea.europa.eu/cs/signaly/signaly-2016/clanky/doprava-a-verejne-zdravi

[34] *Významné oxidy* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://www.komenskeho66.cz/materialy/chemie/WEB-CHEMIE8/vyzmamneoxidy.html

[35] *SNCR* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: http://aaa.erc-online.cz/cs/denox/sncr/

[36] *Měřící aparatura* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: http://www.teso.cz/cs/

[37] HOFER, Petr. *Jak odstranit plíseň a řasy v domě nebo na fasádě* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: http://www.zdrave-bydleni.com/jak-odstranit-plisen-a-rasy-v-dome-nebo-na-fasade/

[38] *Elektrostatické pole* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: http://old.spsemoh.cz/vyuka/zae/el5.htm

[39] *Termoforéza* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/termoforeza.html

[40] *Aerosol* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/aerosol.html

[41] KAULICH, Viktor. *Termoprecipitace a její vliv na kvalitu povrchů fasád* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://atelier-dek.cz/termoprecipitace-jeji-vliv-na-kvalitu-povrchu-fasad-627

[42] *Oxid titaničitý* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: http://m.cz.tio2cnth.com/titanium-dioxide/rutile-titanium-dioxide/white-color-titanium-dioxide.html

[43] *Rutil* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: https://www.fontanadicristalli.cz/l/rutil/

[44] *Anatas* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: http://www.czechfossilsandminerals.com/minerals/anatase/anatase2483

[45] *Brookit* [online]. [cit. 2021-5-28]. Dostupné z: http://www.czechfossilsandminerals.com/minerals/brookite/%20brookite989

4 Seznam obrázků:

Obr. č. 1 Skladba systému ETICS. [23] 12
Obr. č. 2 Příprava omítky „in site“[29] 15
Obr. č. 3 Vertikální aplikace pastovité omítky válečkem. [30] 17
Obr. č. 4 Vodorovné nanášení pastovité omítky pomocí válečku. [30] 17
Obr. č. 5 Lokální topeniště. [31] 19
Obr. č. 6 Schéma benzo[a]pyrenu $C_{20}H_{12}$ [32] 20
Obr. č. 7 Emise a účinnost vozidel. [33] 21
Obr. č. 8 Vliv NOx a SOx. [34] 22
Obr. č. 9 Schéma SNCR technologie. [35] 23
Obr. č. 10 Schéma měřící aparatury. [36] 25
Obr. č. 11 Metoda měření emise. [36] 25
Obr. č. 12 Řasy na fasádě. [37] 27
Obr. č. 13 Výkvěty na fasádě [24] 28
Obr. č. 14 Nehomogenní elektrostatické pole. [38] 28
Obr. č. 15 Nehomogenní elektrostatické pole. [38] 29
Obr. č. 16 Schématické znázornění termoforézy. [39] 30
Obr. č. 17 Velikost částic vyskytující se ve vzduchu. [40] 31
Obr. č. 18 Prokreslení obvodového zdiva na fasádě budovy. [41] 31
Obr. č. 19 Oxid titaničitý [42] 33
Obr. č. 20 Rutil [43] 34
Obr. č. 21 Anatas [44] 34
Obr. č. 22 Brookit. [45] 35
Obr. č. 23 Vyobrazení os pro CIELAB (L*a*b). [24] 41
Obr. č. 24 Tahy vzniklé zrny v omítce při aplikaci. Foto autor. 44
Obr. č. 25 Aplikace adhezního můstku. Foto autor. 44
Obr. č. 26 Adhezní můstek. Foto autor. 44
Obr. č. 27 Nářadí pro aplikaci omítek. Foto autor. 45
Obr. č. 28 Napájený drát na pozinkovaný plech. Foto autor. 45
Obr. č. 29 Klempířská pájka a cín. Foto autor. 45
Obr. č. 30 Popílek jako zkušební médium. Foto autor. 47
Obr. č. 31 Dávkovací zařízení. Foto autor. 49
Obr. č. 32 Dávkovač popílku Foto autor. 50
Obr. č. 33 Umístění mechanismu zajišťující pohon. Foto autor. 50
Obr. č. 34 Detail mechanismu pro pohon. Foto autor. 50
Obr. č. 35 Zásobník na popílek. Foto autor. 51
Obr. č. 36 Zásobník na popílek s nasazeným víčkem v startovní pozici. Foto autor. 51
Obr. č. 37 Zásobník na popílek s nasazeným víčkem v první pozici. Foto autor. 51
Obr. č. 38 Manuálně programovatelné ovládání uložené do krabičky. Foto autor. 53
Obr. č. 39 Krokový motor s přírubou typ Nema 17. Foto autor. 53
Obr. č. 40 Schéma krokového motoru s přírubou typ Nema 17. [27] 54
Obr. č. 41 Spirála dávkovače. Foto autor. 54
Obr. č. 42 Spirála dávkovače. Foto autor. 54
Obr. č. 43 Spirála dávkovače. Foto autor. 55
Obr. č. 44 Sestava pro testování šnekového dopravníku. Foto autor. 55
Obr. č. 45 Soudržnost popílku v násypce. Foto autor. 56
Obr. č. 46 Nová spirála s násypkou – řez. Foto autor. 56

Obr. č. 47 Nová spirála – půdorys. Foto autor. 56
Obr. č. 48 Nová spirála a násypka. Foto autor. 57
Obr. č. 49 Nová sestava pro druhé testování šnekového dopravníku. Foto autor. 57
Obr. č. 50 Detail spojky na tyč a krokový motor. Foto autor. 58
Obr. č. 51 Zkušební komora před namontováním dávkovače č. 2 a Peltiérových článků: Foto autor. 58
Obr. č. 52 Namontovaný dávkovač č. 2 na zkušební komoru. Foto autor. 59
Obr. č. 53 Detail vyvedení dávkovací trubice pod osu větráku. Foto autor 59
Obr. č. 54 Náhradní testovací vzorky po cyklování. Foto autor. 60
Obr. č. 55 Vzorek IA1 Mechanický efe. Foto autor. 62
Obr. č. 56 Vzorek IB1 Mechanický efe. Foto autor 62
Obr. č. 57 Vzorek IA1 Mechanický efekt. – detail. Foto autor. 63
Obr. č. 58 Vzorek IB1 Mechanický efekt – detail. Foto autor 63
Obr. č. 59 Sady I až IV po simulování znečištění. Foto autor. 64
Obr. č. 60 Sada V a VI po simulování znečištění. Foto autor. 65
Obr. č. 61 Šablona pro vyhodnocení spektrofotometrem. Foto autor. 65

5 Grafy:

Graf č. 1 Granulometrie použitého popílku. Zdroj autor 47
Graf č. 2 Hodnoty ΔE^*_{ab} pro omítku A1. Zdroj autor 70
Graf č. 3 Hodnoty ΔE^*_{ab} pro omítku B1. Zdroj autor 71

6 Seznam tabulek:

Tab. č. 1 Spektrální oblasti [23] 37
Tab. č. 2 Komplementarita barev [23] 38
Tab. č. 3 Klasifikace odchylky barevného odstínu [24] 40
Tab. č. 4 Deklarované vlastnosti omítky A1 [25] 42
Tab. č. 5 Deklarované vlastnosti omítky B1 [26] 43
Tab. č. 6 Přepočet koncentrace PM_{10}. 46
Tab. č. 7 Přepočet koncentrace PM_{10} pro zkušební komoru. 46
Tab. č. 8 Granulometrie použitého popílku 48
Tab. č. 9 Parametry krokového motoru Nema 17.[28] 54
Tab. č. 10 : Rozložení vzorků. 61
Tab. č. 11 Rozložení sady VI. 61
Tab. č. 12 : Rozložení vzorků. 63
Tab. č. 13 Naměřené a vypočítané hodnoty sad I až IV 66
Tab. č. 14 Naměřené a vypočítané hodnoty pro sady V a VI. 67
Tab. č. 15 Naměřené hodnoty referenčních vzorků. 67
Tab. č. 17 Výsledky mikroskopického snímkování vzorků s omítkou A1 68
Tab. č. 18 Výsledky mikroskopického snímkování vzorků s omítkou B1 69
Tab. č. 19 Průměrné hodnoty $\Delta Eab*$ 71