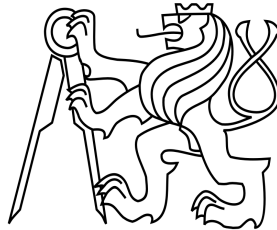


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

Diplomová práce

**MĚŘENÍ TEPLoty A RYCHLOSTI PROUDĚNÍ
PLYNU V PODMÍNKÁCH ZKOUŠKY
ROOM CORNER TEST**

MEASUREMENT OF TEMPERATURE AND GAS FLOW VELOCITY
IN THE TEST CONDITIONS
OF ROOM CORNER TEST

Bc. Lucie Spourová

Vedoucí práce: Ing. Marek Pokorný, Ph.D.

2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Spourová	Jméno: Lucie	Osobní číslo: 423656
Zadávající katedra: Katedra konstrukcí pozemních staveb		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Měření teploty a rychlosti proudění plynu v podmínkách zkoušky room corner test	
Název diplomové práce anglicky: Measurement of temperature and gas flow velocity in test conditions of room corner test	
Pokyny pro vypracování: 1) Stav poznání v daném tématu 2) Rámcová definice zkoušky room corner test, disponující výzkumná pracoviště 3) Typy měřicích zařízení a jejich umístění ve zkoušce 4) Princip měření a přepočtu na žádané jednotky 5) Variantní řešení fixace termoelektrických článků na exponovaný povrch stropní konstrukce 6) Citlivostní analýza na CFD modelu s ohledem na charakter měřicího zařízení	
Seznam doporučené literatury: [1] ISO 9705-1, Reaction to fire tests - Room Corner Test for wall and ceiling lining products [2] ISO/TR 9705-2:2001 Reaction-to-fire tests - Full-scale room tests for surface products [3] WALD, F. a kol. Modelování dynamiky požáru v budovách. Praha: ČVUT v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-05633-2. [4] SFPE handbook of fire protection engineering. 3rd ed. Bethesda, Md.: Society of Fire Protection Engineers, 2002. [5] Fire Dynamics Simulator User's Guide. 6th ed. NIST, Fire Research Division Engineering Laboratory Gaithersburg, Maryland, USA, 2014	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Marek Pokorný, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 1.10.2018	Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání 1.10.2018	Podpis studenta(ky)
------------------------------------	---------------------

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Spourová Lucie

Název diplomové práce: Měření teploty a rychlosti proudění plynu v podmínkách zkoušky room corner test

Základní část: viz název diplomové práce podíl: 100 %

Formulace úkolů:

1) Stav poznání v daném tématu

2) Typy měřících zařízení a jejich umístění ve zkoušce, principy přepočtů

3) Variantní řešení fixace termoelektrických článků

4) Citlivostní analýza na CFD modelu s ohledem na charakter měřícího zařízení

Podpis vedoucího DP:

Datum: 1. 10. 2018

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

-

-

Podpis konzultanta:

Datum:

3. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

-

-

Podpis konzultanta:

Datum:

4. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

-

-

Podpis konzultanta:

Datum:

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Měření teploty a rychlosti proudění plynu v podmínkách zkoušky Room Corner Test vypracovala samostatně za použití všech uvedených zdrojů pod odborným vedením Ing. Marka Pokorného, Ph.D.

Nemám námitek proti použití této školní práce ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 6.1.2019

.....

Bc. Lucie Spourová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu své diplomové práce Ing. Marku Pokornému, Ph.D. za odborné konzultace, vedení i trpělivost. Dále děkuji zaměstnancům požární laboratoře v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT v Praze za ochotnou spolupráci při experimentu.

Nakonec bych chtěla z celého srdce poděkovat rodičům, že mi umožnili studovat, dostat se až k této práci a po celou dobu mě podporovali.

Obsah

Abstrakt	III
Abstract	III
Seznam použitých symbolů a zkratek	IV
1 Úvod	6
2 Současný stav poznání	8
2.1 Velkorozměrové požární zkoušky	8
2.2 Měření teploty	9
2.2.1 Termoelektrické články – princip funkce	9
2.2.2 Termoelektrické články – konstrukce	10
2.2.3 Kabely s minerální izolací pro termoelektrické články	11
2.2.4 Plášťové termoelektrické články	12
2.2.5 Deskové snímače teploty	16
2.2.6 Deskové snímače teploty – konstrukce	16
2.2.7 Deskové snímače teploty – umístění	17
2.2.8 Diskové termoelektrické články	18
2.2.9 Diskové termoelektrické články – konstrukce	19
2.2.10 Diskové termoelektrické články – připevnění	19
2.3 Způsoby instalace a připevnění termoelektrických článků pro zkoušku Room Corner Test	20
2.3.1 Instalace termoelektrických článků dle normových požadavků	20
2.3.2 Instalace termoelektrických článků při experimentu ve Švédsku	21
2.4 Rychlost proudění plynů	25
2.4.1 Metody měření průtoku	26
2.4.2 Pitotova trubice	26
3 Experimentální ověření	32
3.1 Matematické modely	33
3.2 Výsledky z matematických modelů	37
3.2.1 Matematický model bez desky ve dveřním otvoru	38
3.2.2 Matematický model s deskou ve dveřním otvoru	42
3.3 Požární experiment	46
3.3.1 Průběh požárního experimentu	49
3.3.2 Výsledky požárního experimentu	53
3.4 Porovnání požárního experimentu a matematického modelu s deskou ve dveřním otvoru	58
3.4.1 Povrchové teploty	58
3.4.2 Teploty plynu	60
4 Závěr	65
4.1 Matematické modely s deskou z minerální izolace ve dveřním otvoru a bez ní	65
4.2 Požární experiment	66
4.3 Doporučení pro navazující činnost	67

Příloha 1 Zdrojový kód matematického modelu bez desky.....	68
Příloha 2 Zdrojový kód matematického modelu s deskou	70
Příloha 3 Technický list desky Nefalit	72
Seznam obrázků	73
Seznam tabulek.....	76
Literatura	77

Abstrakt

Cílem práce je shrnutí problematiky měření teploty a rychlosti proudění v podmínkách zkoušky Room Corner Test, především se zaměřuje na typy používaných měřidel, princip měření a přepočty na žádané jednotky, dále také na možnosti a vliv připevnění měřidel, konkrétně termoelektrických článků k povrchu stropní konstrukce. Vše bylo řešeno teoreticky i prakticky, teoreticky pomocí literatury popisující jednotlivá měřicí zařízení a udávající metodiku zkoušení, dále vytvořením matematických modelů v softwaru FDS (Fire Dynamics Simulator), který je založen na metodě CFD (Computational Fluid Dynamics). V matematických modelech byla vytvořena zkušební místnost (Room Corner Test) ve zmenšeném měřítku a zdefinována potřebná měřicí zařízení. Praktickou částí je provedení požárního experimentu na základě jednoho matematického modelu, kde byly navíc zkoumány již zmíněné způsoby připevnění měřidel povrchových teplot. Výsledkem práce je popis získaných informací z matematických modelů i požárního experimentu a porovnání výsledků v jednotlivých matematických modelech a vybraného modelu s požárním experimentem. V neposlední řadě diplomová práce udává směr pro možnou navazující výzkumnou činnost.

Klíčová slova

citlivostní analýza; deskový snímač teploty; měření teploty; Pitotova trubice; požární experiment; obousměrná sonda; Room Corner Test; rychlost proudění; termoelektrický článek; FDS; CFD

Abstract

The goal of the thesis is to summarize the problems of temperature and gas velocity measurement in a Room Corner Test, especially the thesis focuses on device types used during measurement, measurement principles and required unit conversion, as well as options and the impact of the attachment of the measuring devices, namely fastening thermocouples to the surface of the ceiling. Everything was handled both theoretically and practically: theoretically by using literature which describes individual measuring devices and provides the methodology of testing and by creating mathematical models in FDS (Fire Dynamics Simulator) software, which is based on the CFD (Computational Fluid Dynamics) method. A small-scale Room Corner Test was created in mathematical models and the necessary measuring devices were defined. The practical part consists of performing a fire experiment based on one mathematical model. Mentioned methods of attachment of the devices measuring surface temperature were observed here. A description of the information acquired through mathematical models and the fire experiment is the result of the work, and also the comparison of the results in individual mathematical models and a selected model with a fire experiment. Last but not least, the thesis gives the direction for possible follow-up research activity.

Keywords

sensitivity analysis; plate thermometer; measurement of temperature; Pitot tube; fire experiment; bi-directional probe; Room Corner Test; flow velocity; thermocouple; FDS; CFD

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

A	Plocha průřezu odtahového potrubí	m ²
C	Sutherlandova konstanta	–
m	Hmotnostní průtok	kg/s
k _t	Kalibrační konstanta	[-]
k _p	Reynoldsova číselná korekce pro obousměrnou sondu	[-]
p _c	Celkový tlak	Pa
p _s	Statický tlak	Pa
p _d	Dynamický tlak	Pa
Δp	Tlakový rozdíl měřený obousměrnou sondou	Pa
Q	Objemový průtok	m ³ /s
Re	Reynoldsovo číslo	–
S	Průtočná plocha	m ²
T	Teplota	°C
T ₀	Teplota 273,15 K	K
T _s	Teplota plynu v odtahovém potrubí	K
T _o	Referenční teplota	°R
v	Rychlost proudění	m/s
Ḃ ₂₉₈	Objemový průtok v obousměrné sondě	m ³ /s

Řecké symboly

ρ	Hustota tekutiny	kg/m ³
ρ ₀	Hustota vzduchu při 0 °C a tlaku 0,1 MPa	kg/m ³
ρ ₂₉₈	Hustota vzduchu při 25 °C a atmosférickém tlaku	kg/m ³
μ	Dynamická viskozita vzduchu při dané teplotě vzduchu	centipoise
μ _o	Referenční viskozita vzduchu při T _o	centipoise

Zkratky

ČR	Česká republika
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
OS	Obousměrná sonda
PT	Plate Thermometers – deskové snímače teploty
RCT	Room Corner Test
TC	Thermocouple – plášťový termoelektrický článek
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze

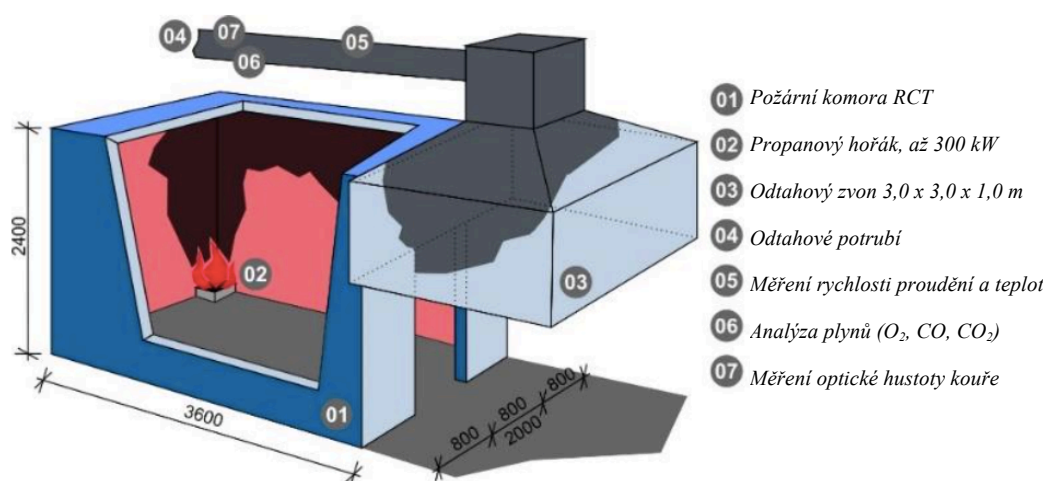
Indexy

bd	bez desky
ex	experiment
sd	s deskou

1 Úvod

Motivací k vytvoření této diplomové práce je to, že požární zkoušky jsou díky četnosti a důrazu kladeného na správnost provedení aktuální problematikou. Zásadní roli hrají typy používaných měřidel a jejich instalace v závislosti na tom, zda se během požární zkoušky měří teploty plynu, povrchové či jiné teploty – například ve stavebních výrobcích.

Typickými požárními zkouškami jsou například zkoušky typu požární odolnost nebo malorozměrové zkoušky reakce na oheň. Zkušební zařízení pro velkorozměrové zkoušky reakce na oheň, tedy Room Corner Test (obr. 1), je v Evropě ojediněle a je instalováno např. v ČR v požární laboratoři (FireLAB) v UCEEB ČVUT v Praze. Toto zařízení slouží pro sledování účinků požáru různých stavebních výrobků a jejich povrchových úprav. Zařízení pro měření teplot jsou umístěna jak v samotné místnosti, tak v odtahovém potrubí (obr. 1, místo 05), kde je zároveň umístěna sonda pro měření rychlosti plynu v potrubí, která je také popsána v této diplomové práci. Více o velkorozměrových zkouškách nejen u nás, ale i v dalších částech Evropy, je napsáno v následující kapitole.



obr. 1: dispozice zkoušky RCT [1]

Pro potřeby této diplomové práce je klíčová především schopnost měřit teploty (s použitím termoelektrických článků a deskových snímačů) i rychlost proudění (pomocí Pitotovy trubice), což bude blíže popsáno v následujících kapitolách, dále namodelováno a bude proveden a popsán výpočet v programu FDS 6.6.0 a vizualizováno pomocí programu Smokeview 6.6.0. Součástí řešení je zkoumání vlivu zmenšení otvoru na průběh zkoumaných veličin, tudíž jsou vytvořeny dva matematické modely (s dveřním otvorem bez zakrytí a s dveřním otvorem z části zakrytým minerální izolací) a aby bylo možné výpočty validovat, je také proveden a popsán požární experiment s otvorem z části zakrytým. Důvodem pro výběr je, že teploty v prázdné místnosti se zcela otevřeným otvorem jsou dosti nízké, zakrytím horní části otvoru se zvýší, což je žádoucí zejména z hlediska způsobu fixace TC na povrch stropu. Z důvodu lepší proveditelnosti

jsou modely matematické i ten reálný ve zmenšeném měřítku, konkrétně třetinovém. Více v samotné kapitole experimentálního ověření.

Co se týče teoretické části této diplomové práce, druhá kapitola se skládá ze 4 podkapitol, které řeší výše zmíněnou problematiku a uvádějí i příklady z praxe.

V podkapitole 2.1 je blíže popsána požární laboratoř v ČR a vypsány další, které slouží také pro provádění velkorozměrových zkoušek (tedy zkušební zařízení RCT) v Evropě.

V podkapitole 2.2 jsou popsána měřicí zařízení – termoelektrické články, jejich konstrukce i na jakém principu pracují. Dále jejich typy, požadavky na ně kladené a jsou uvedeny i příklady přímo od výrobců termoelektrických článků a dalších měřících zařízení. Vedle TC jsou popsány ještě deskové snímače teploty a diskové TC, jejich konstrukce i umístování.

V podkapitole následující, tedy 2.3, jsou zmíněny možnosti instalace TC, doporučení dané normou věnovanou RCT a dále popsán experiment ve Švédsku, na Lund University, který probíhal v mini RCT a jedním z cílů bylo zjištění vlivu různého umístění a připevnění termoelektrických článků na měření teplot. Dále se zkoumalo, jaký vliv má na výstupy z termoelektrických článků jejich průměr.

V poslední podkapitole, a to v podkapitole 2.4, jsou uvedeny informace o rychlosti proudění a o zařízeních, které slouží k jejímu měření a k určení pomocí výpočtu.

Předposlední kapitolou je experimentální ověření, což zahrnuje vytvoření dvou matematických modelů a provedení reálného požárního experimentu. Součástí jsou v Příloze 1 a v Příloze 2 zdrojové kódy použité pro výpočet. V této části diplomové práce jsou porovnávány jednotlivé výstupy z programu FDS i výstupy naměřené při samotném požárním experimentu a popsány příčiny možných rozdílů mezi zkoumanými veličinami jak z hlediska umístění měřících zařízení a jejich typu, tak z hlediska vlivu velikosti otvoru sloužícího pro přívod i odvod vzduchu do a z místnosti.

V závěru diplomové práce jsou shrnuty získané poznatky a doporučení pro další možnou navazující výzkumnou činnost.

2 Současný stav poznání

Prvním tématem této kapitoly bude seznámení s velkorozměrovými zkouškami (tedy RCT) nejen u nás, ale i ve zbytku Evropy. Dále v této kapitole budou shrnuty poznatky z norem, odborných článků, od výrobců apod., které se týkají problematiky měření teploty a rychlosti proudění. V jednotlivých podkapitolách budou blíže specifikovány typy používaných měřidel, jejich použití a vliv instalace na měření žádaných parametrů.

2.1 Velkorozměrové požární zkoušky

V zařízení RCT se zkouší chování povrchových úprav stěn či stropů nebo chování jednotlivě hořících předmětů, a to díky fyzikální a chemické analýze zplodin hoření včetně účinků toxicity. Zkušební zařízení, které bylo vidět již na obr. 1, je tvořeno požární komorou, odsávacím zvonem a potrubím, zápalným zdrojem (plynový hořák s nastavitelným tepelným výkonem 100 až 300 kW) a dále přístroji pro měření optické hustoty kouře a infračervenou spektrální analýzu zplodin hoření (není obvyklou součástí RCT, v UCEEB ČVUT v Praze ano). Nalezneme zde i měřicí zařízení, jako jsou termoelektrické články, radiometry, rychlostní sondy, analyzátory kyslíku, oxidu uhličitého a uhelnatého.

Jak již bylo napsáno v úvodu, i u nás, v ČR, je toto zařízení. RCT zařízení je umístěno v požární laboratoři FireLAB v UCEEB ČVUT v Praze, lze nalézt i na webových stránkách www.uceeb.cz/pozarni-laborator.

Další tři zkušební zařízení v Evropě, ale už mimo ČR, jsou následující dle [2] včetně webových stránek:

- Finsko VTT Technical Research Centre of Finland
www.vttresearch.com
- Švédsko RISE Research Institutes of Sweden
www.sp.se
- Norsko SINTEF NBL
www.sintef.no

Další místa, kde je zkušební zařízení RCT v Evropě, jsou zmíněna například již v dříve napsané diplomové práci [3]:

- Polsko Instytut Techniki Budowlanej
www.itb.pl
- Belgie Ghent University
www.floheacom.ugent.be

2.2 Měření teploty

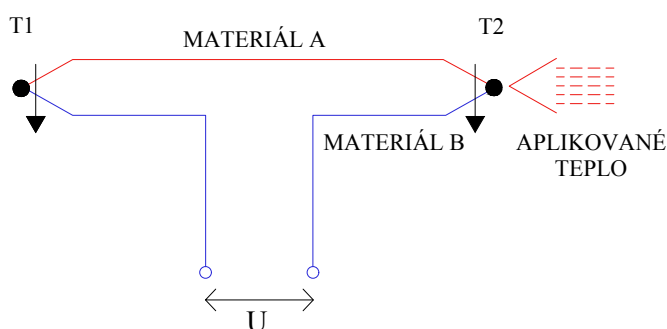
Obecně mohou být snímače teplot přímé a nepřímé. Přímé ukazují aktuální hodnotu teploty (termokamery), ty nepřímé se po dosažení teploty mohou deformovat, měnit barvu apod. (žároměrky). Dalším rozdělením je dělení na snímače teploty dotykové (termoelektrické články) a bezdotykové (pyrometry).

V této kapitole jsou popsány nejpodrobněji plášťové snímače teploty (termoelektrické články), které jsou hojně používány díky své široké použitelnosti, tepelné odolnosti, přesnosti, ceně, jednoduchému principu a životnosti. Používají se jak pro měření teplot plynu, tak pro teploty povrchové. Vedle termoelektrických článků je možnost používat např. deskové snímače teploty (anglicky Plate Thermometers – PT). Ty se používají například v uzavřených pecích, jejich součástí je 1 nebo více plášťových TC umístěných pod deskou. Dále existují např. i diskové termoelektrické články, které slouží pro měření povrchových teplot.

2.2.1 Termoelektrické články – princip funkce

Termoelektrické články jsou termoelektrická zařízení, která využívají fyzikálních jevů. Při jevech termoelektrických dochází ke změně energie z tepelné na elektrickou a naopak. Mezi tyto jevy patří tři základní – Seebeckův (v látkách vzniká termoelektrické napětí s teplotním gradientem, blíže popsán v dalším odstavci), Peltierův (při protékání elektrického proudu dochází k pohlcování nebo uvolňování tepla na kontaktech) a Thomsonův jev (také dochází k pohlcování nebo uvolňování tepla v objemu látky, která protéká elektrickým proudem za přítomnosti teplotního gradientu).

V roce 1821 objevil německý fyzik Thomas Johann Seebeck jev (později pojmenován jako Seebeckův termoelektrický jev), který popisuje vznik napětí v obvodu skládajícího se ze dvou různých vodičů, na jejichž koncích jsou různé teploty. Stručný popis principu termoelektrického obvodu je takový, že z důvodu rozdílných teplot na koncích vodičů, které jsou vodivě spojeny, se na každém konci objeví také různý potenciál (napětí), jak je zobrazeno na obr. 2.

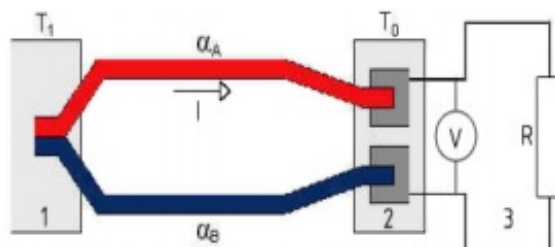


obr. 2: Seebeckův termoelektrický jev [4]

materiál A a B – různé kovové materiály, T1 a T2 – různé teploty spojů, U – termoelektrické napětí

2.2.2 Termoelektrické články – konstrukce

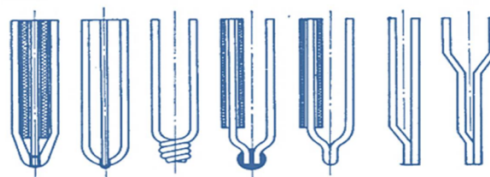
Konstrukce termoelektrického článku je vyobrazena na obr. 3. Termoelektrický článek tvoří dva vodiče z rozdílných kovových materiálů, které jsou na koncích vodivě spojeny. Uvnitř každého termoelektrického článku se nachází tzv. kompenzační obvod, který kompenzuje elektrický obvod (korekce odchylky napětí).



obr. 3: konstrukce termoelektrického článku [5]

1 – měřicí spoj, 2 – srovnávací spoj, 3 – kompenzační obvod, α_A, α_B – vodiče s různým termoelektrickým součinitelem

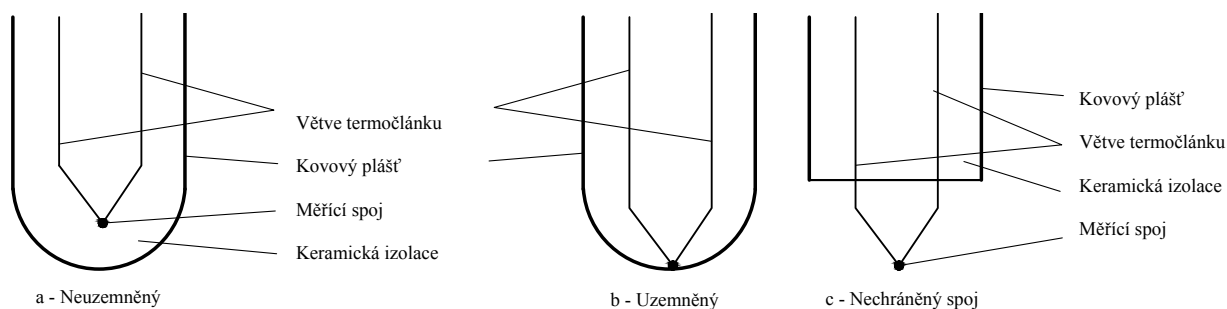
Pomocí mechanických spojů, pájením nebo sváření vodičů (obr. 4) o stejném průměru se provádí měřicí spoj, který je při zkouškách vystaven měřené teplotě.



obr. 4: příklady řešení měřicího spoje termoelektrických článků [6]

Konce termoelektrických článků mají celkem tři možná provedení – mohou být chráněné – izolované (uzemněné a neuzemněné, obr. 5), tedy se hovoří o plášťových termoelektrických člancích, viz kapitola 2.2.4, jejichž základem jsou kabely s minerální izolací, viz kapitola 2.2.3.

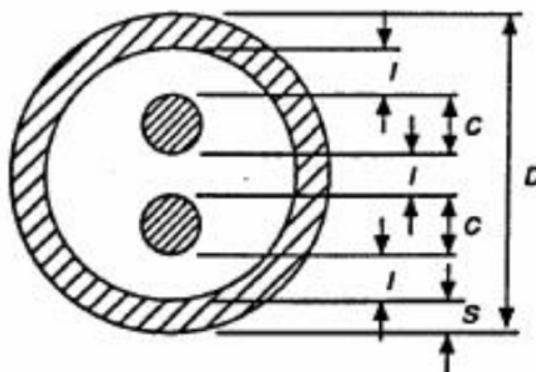
Nejjednodušší formou jsou nechráněné – drátové termoelektrické články (viz obr. 5), mají neuzemněné spoje a jejich použití má řadu omezení (např. se nesmí používat v agresivním a vlhkém prostředí), oproti tomu výhodou je velmi rychlá odezva. Používají se pro měření teploty plynu, kdy jsou nejvhodnějším typem.



obr. 5: provedení konců termoelektrických článků [5]

2.2.3 Kabele s minerální izolací pro termoelektrické články

Kabele s minerální izolací pro termoelektrické články (obr. 6) jsou ohebné a kovem opláštěné kabele, jejichž vodiče jsou izolovány ztuhnutým oxidem kovu, konkrétně ztuhnutého práškového oxidu hořečnatého nebo oxidu hlinitého o stupni čistoty nejméně 96 %. Vodiče, tedy větve termoelektrického článku, určují typy termoelektrických článků.



obr. 6: příčný řez kabelem s minerální izolací [7]

D – vnější průměr, C – průměr vodiče, S – tloušťka stěny pláště, I – tloušťka izolace

Jednotlivé rozměry vyobrazené na obr. 6 mohou nabývat hodnot shrnutých v tab. 1.

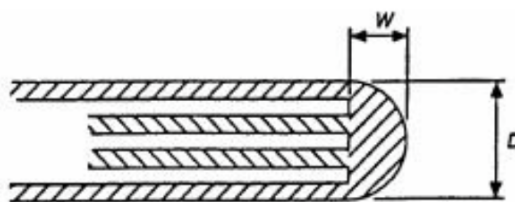
tab. 1: rozměry vyznačených průměrů i tloušťek na obr. 6 [7]

Vnější průměr kabelu (D) jmenovitý \pm tolerance [mm]	Tloušťka stěny pláště (S) minimálně [mm]	Průměr vodiče (C) minimálně [mm]	Tloušťka izolace (I) minimálně [mm]
0,5 \pm 0,025	0,05	0,08	0,04
1,0 \pm 0,025	0,10	0,15	0,08
1,5 \pm 0,025	0,15	0,23	0,12
2,0 \pm 0,025	0,20	0,30	0,16
3,0 \pm 0,030	0,30	0,45	0,24
4,5 \pm 0,045	0,45	0,68	0,36
6,0 \pm 0,060	0,60	0,90	0,48
8,0 \pm 0,080	0,80	1,20	0,64

2.2.4 Plášťové termoelektrické články

Plášťové termoelektrické články jsou zhotoveny z kabelů popsaných v kapitole 2.2.3 a liší se svými měřicími spoji, které jsou oba chráněné – izolované a mohou být dvojího typu:

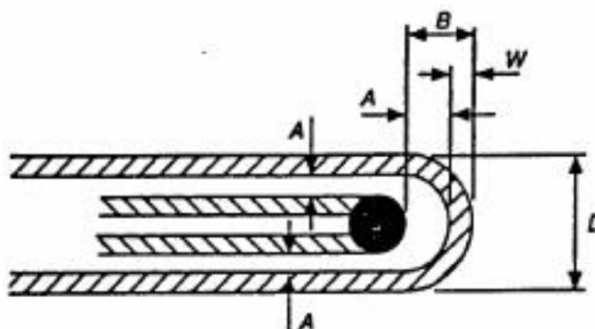
- izolované uzemněné (obr. 7) – měřicí spoj elektricky vodivě spojen s kovovým pláštěm
 - výhoda – rychlá časová odezva
 - nevýhoda – velká citlivost na uzemněné měřicí elektrické smyčky



obr. 7: podélný řez uzemněným měřicím spojem termoelektrického článku [7]

D – vnější průměr, W – tloušťka svaru (velikost – min. $0,1D$, max. $0,8D$)

- izolované neuzemněné (obr. 8) – měřicí spoj elektricky izolován od kovového pláště
 - výhody – díky izolaci chráněn lépe proti vlivům prostředí, vhodným zapojením lze potlačit vliv elektromagnetického rušení a zemních smyček
 - nevýhoda – delší doba odezvy



obr. 8: podélný řez neuzemněným měřicím spojem termoelektrického článku [7]

D – vnější průměr, A – tloušťka izolace (velikost – min. $0,05D$), V – tloušťka svaru (velikost – min. $0,1D$, max. $0,8D$), B – poloha spoje (velikost – min. $0,15D$, max. $1,5D$)

Co se týče rozměrů plášťových termoelektrických článků, vnější průměr pláště D [mm] pro oba typy termoelektrických článků nabývá hodnot uvedených v tab. 2, pro ostatní části termoelektrických článků (platí stejně pro uzemněné i neuzemněné) jsou rozměry a tolerance dle tab. 1 – tedy stejně jako pro kabely termoelektrických článků.

tab. 2: tolerance vnějšího průměru v okolí měřicího spoje [7]

Vnější průměr pláště D [mm]	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,5	6,0	8,0
Tolerance [mm]	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$	$\pm 0,10$

Jak již bylo napsáno v 2.2.3, dle použité dvojice kovů (vodičů) rozeznáváme několik typů termoelektrických článků. Ty se původně značily chemickým složením, nyní dle ČSN EN 60 584-1 [8] velkými písmeny – viz tab. 3:

tab. 3: značení termoelektrických článků dle ČSN EN 60 584-1:2014 [6]

Označení	Původní značení dle složení	Doporučený teplotní rozsah použití [°C]	Barevné označení	
			Kladný pól	Záporný pól
<i>T</i>	<i>Cu-CuNi</i>	+200 až +350	hnědá	bílá
<i>J</i>	<i>Fe-CuNi</i>	+400 až +750	černá	bílá
<i>E</i>	<i>NiCr-CuNi</i>	+440 až +800	fialová	bílá
<i>K</i>	<i>NiCr-NiAl</i>	+750 až +1200	zelená	bílá
<i>N</i>	<i>NiCrSi-NiSi</i>	+850 až +1250	lila	bílá
<i>S</i>	<i>Pt10Rh-Pt</i>	+1400 až +1600	oranžová	bílá
<i>R</i>	<i>Pt13Rh-Pt</i>	+1400 až +1600	oranžová	bílá
<i>B</i>	<i>Pt30Rh-Pt6Rh</i>	+1500 až +1700	bez údaje	bílá

V ČR se používá pro zkoušky požární odolnosti termoelektrický článek typu K, jelikož v ČSN EN [9] je napsáno: „Pro zjištění teploty prostředí v laboratoři v blízkosti zkušebního vzorku před zkouškou i během ní se použije termoelektrický článek. Termoelektrický článek musí mít jmenovitý průměr 3 mm; musí to být termoelektrický článek typu K, stanovený v EN 60584-1, s tolerancemi stanovenými v EN 60584-2, izolovaný minerálním materiálem, s pláštěm z korozivzdorné oceli...“.

Další požadavky kladené na jakýkoli typ termoelektrických článků [5]:

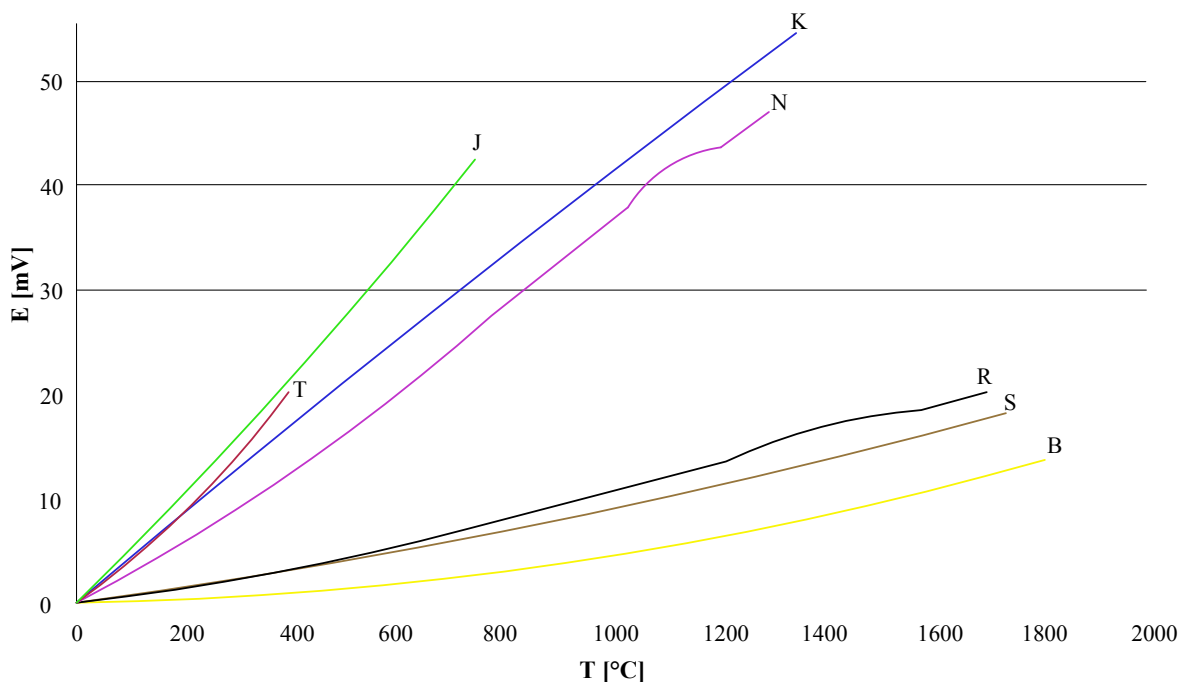
- lineární průběh napětí
- odolnost proti korozi
- vysoký koeficient teplotního napětí
- mechanická a chemická odolnost v oxidačním a redukčním prostředí
- stálost termoelektrických vlastností v čase
- příznivý dynamický výkon termoelektrických článků
- použitelnost v širokém rozsahu teplot

Uvedené vlastnosti se odvíjejí od výběru vhodné dvojice kovů, ze kterých se termoelektrický článek zhotoví. V tab. 4 jsou uvedeny základní vlastnosti vybraných termoelektrických článků.

tab. 4: základní vlastnosti termoelektrických článků [6]

Ozn.	Původní značení dle složení	Termoel. napětí (mV/100 °C)	Použitelnost (°C)		Odolnost v prostředí	
			Trvale	Krátkodobě	oxidačním	redukčním
T	Cu-CuNi	4,25	-200 až +400	+600	malá	/
J	Fe-CuNi	5,37	-200 až +600	+900	malá	velká
K	NiCr-NiAl	4,8	-50 až +1000	+1300	velká	malá
S	Pt10Rh-Pt	0,64	0 až +1300	+1800	velká	malá

Vhodná dvojice se stanovuje na základě předpokládaného rozsahu měřených hodnot, a to konkrétně podle závislosti elektromagnetického napětí na teplotě – pro vybrané termoelektrické články znázorněno na obr. 9. Změna napětí mezi vybranými kovy musí být co největší.



obr. 9: závislost termoelektrického napětí na teplotě pro vybrané termoelektrické články [6]

Z grafu je u používaného termoelektrického článku typu K patrné, že má nejlineárnější průběh, avšak nedosahuje nejvyšších teplot ani neposkytuje nejvyšší termoelektrické napětí. Zbylé vlastnosti dalších termoelektrických článků se shodují s informacemi uvedenými v tab. 4.

Co se týče dostupnosti plášťových (i dalších) termoelektrických článků, mezi české výrobce termočlánekových a odporových snímačů teplot patří např. MAVIS Nový Bor s.r.o. Mezi vyhovující termoelektrické články ČSN EN [9] patří např. nabízené TC: *MTC 10 – plášťové termočlánky – bez / s konektorem*. Jejich reálné provedení je zobrazeno na obr. 10, podrobnější

charakteristika těchto plášťových termoelektrických článků včetně rozměrů dostupná na stránkách výrobce.



obr. 10: reální fotografie PT: MTC10 - plášťové termočlánky – bez / s konektorem¹

Dalším známým výrobcem je Günther GmbH z Německa. Tento výrobce nabízí v sekci „Termoelektrické teploměry“ např. termoelektrické články bez ochranných trubek v rozsahu hodnot pro průměr pláště 0,5–8 mm, které jsou zobrazeny na obr. 11:



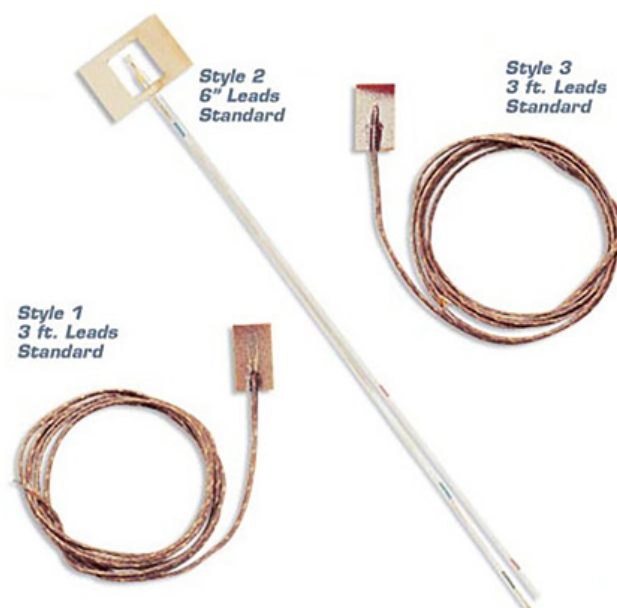
obr. 11: termoelektrické články bez ochranných trubek²

Mezi výrobce mezinárodní patří např. původem americký výrobce OMEGA Engineering na webových stránkách www.omega.com. V jejich nabídce jsou např. nalepovací termoelektrické články nabízené v provedení typu K, E a T. Slouží pro povrchová měření teplot, mají rychlou dobu

¹ dostupné na stránkách výrobce MAVIS Nový Bor s.r.o. – www.mavis.cz

² dostupné na stránkách výrobce Günther GmbH – www.guenther.eu

odezvy a dají se přidělat například cementem – zobrazeny na obr. 12. Další informace o těchto termoelektrických člancích jsou dostupné na stránkách výrobce.



obr. 12: Cement-On Surface Thermocouples³

2.2.5 Deskové snímače teploty

Díky vhodné konstrukci mohou deskové snímače teploty, tedy PT, zaznamenat složky tepelného toku a vypočítat množství tepelného namáhání, které přijala konstrukce prouděním a sáláním. Samotné měření provádí 1 nebo více plášťových termoelektrických článků pod deskou. Před jejich prvním použitím se však musí nechat ohýbaná deska PT vyžrát, a to buď tak, že se uloží na hodinu do předeřtáté pícky na 1000 °C, nebo se po dobu 90 minut ohřívá v peci na zkoušení požární odolnosti.

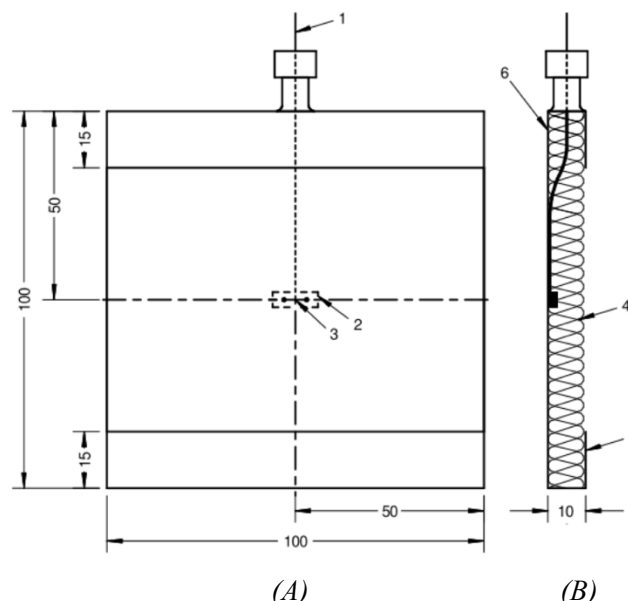
2.2.6 Deskové snímače teploty – konstrukce

Konstrukce je znázorněna na obr. 13, tělo PT je tvořeno ohnutou deskou ze slitiny na bázi niklu, ke které je připevněn TC z drátu typu K a ten je uzavřen v izolačním materiálu.

Deska PT o rozměrech cca (± 1 mm) 100 x 100 x 0,7 mm musí být zhotovena z proužků vysoce legované austenitické slitiny na bázi niklu a musí vydržet velmi vysoké teploty. Izolační materiál kolem TC je z minerální izolace, kolem které je navíc plech z ocelové slitiny tl. 1 až 3 mm z důvodu lepší tepelné a mechanické odolnosti. Měřicí spoje TC jsou od pláště

³ dostupné na stránkách výrobce OMEGA Engineering – www.omega.com

z ocelové slitiny elektricky izolovány a musí být připevněny ve středu desky páskem stejného materiálu jako je deska. Pásek se připevní pomocí šroubu nebo přivaření.



obr. 13: konstrukce deskového snímače teploty: (A) pohled zezadu bez izolace, (B) pohled ze strany [6] (rozměry uvedeny v milimetrech)

- 1 plášťový termoelektrický článek typu K – NiCr-NiAl s izolovaným měřicím spojem
- 2 bodově přivařený (18x6 mm) nebo přišroubovaný ocelový pásek (25x6 mm), šroub musí mít průměr 2 mm
- 3 měřicí spoj termočlánku
- 4 minerální izolační materiál ($97 \pm 1 \text{ mm} \times 97 \pm 1 \text{ mm} \times 10 \pm 1 \text{ mm}$), objem. hmotnost ($280 \pm 30 \text{ kg/m}^3$)
- 5 pásek slitiny niklu o délce ($150 \pm 1 \text{ mm}$), šířce ($100 \pm 1 \text{ mm}$) a tloušťce ($0,7 \pm 1 \text{ mm}$)
- 6 strana A" – přijímající tepelný tok

Kvůli celkem velké ploše desky je PT oproti TC méně citlivý při měření teploty plynu a rychlosti proudění, ale je relativně citlivější na působení tepla radiací stejně jako zkoumané vzorky. Naopak malá tloušťka desky způsobuje rychlejší odezvu na změny teplot v místnosti.

2.2.7 Deskové snímače teploty – umístění

Primárně se PT používají pro řízení teploty v pecích a měření tepelného toku, který působí na zkoušené konstrukce. Jejich rozmístění popisuje norma [9], konkrétně kapitola 9.1.1 Termoelektrické články v peci (deskové snímače teploty). Pro umístění PT jsou uplaňovány následující zásady:

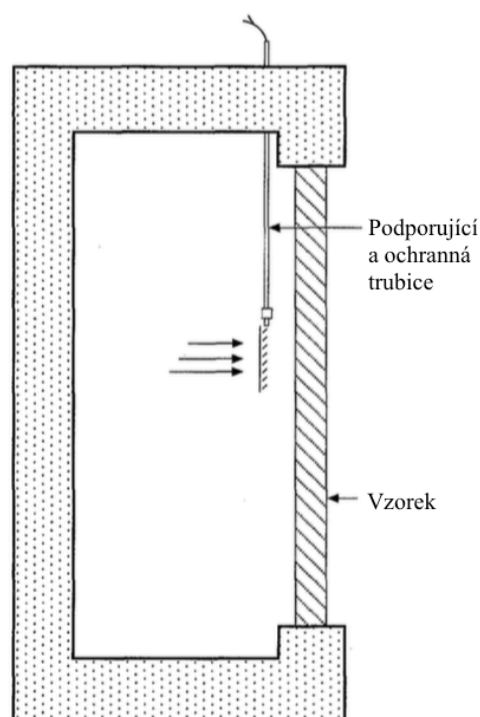
- každý PT se při měření teploty v peci rozmístí tak, aby uváděl průměrnou teplotu v blízkosti vzorku
- žádný PT nesmí být ve styku s plameny hořáků

- všechny PT musí být vzdáleny min. 450 mm od stěn, podlahy i stropu pece
- každý PT musí být 100 ± 50 mm od nejbližšího bodu ohřívaného povrchu zkoušené konstrukce od začátku experimentu nejlépe po celý průběh

V příloze C této normy [9] je, v kapitole C.1.2 Umístění, uvedeno, že podpora PT nemá procházet vzorkem ani k němu být připevněna.

Další norma [10], která se věnuje umístění PT, má v kapitole 9.1 Deskové snímače v peci, že na každou ohřívanou povrchovou plochu o $1,5 \text{ m}^2$ zkoušené konstrukce má být osazen alespoň jeden PT. Orientace PT má být taková, že ve stěnové peci má strana A na obr. 13 směřovat k zadní straně pece, v horizontální peci k podlaze pece.

Mimo již zmíněné normy [9] a [10] je rozmístění na obr. 14 popsáno například i v článku [11], kde je navrženo 10 cm (stejně jako v normě [9]) od vzorku směrem k vnitřku pece přední stranou (což je opačně na rozdíl od normy [10]), zadní strana odvrácená od vzorku je zde izolována keramickou deskou, která by bránila radiční výměně tepla mezi vzorkem a PT například při měření rozložení teplot přímo na povrchu vzorku.



obr. 14: umístění deskového snímače v peci [11]

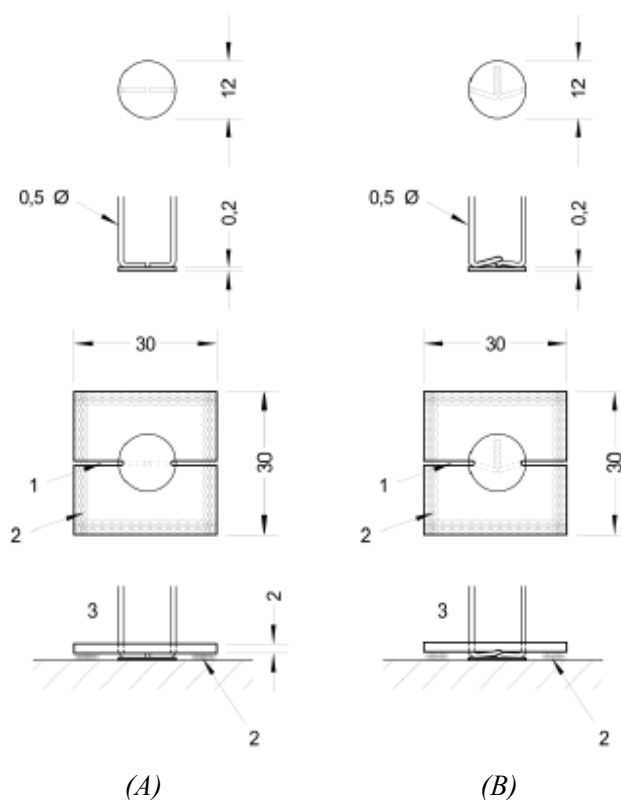
Pro účely této diplomové práce bude umístěn PT v blízkosti TC v rohovém prostoru zkušební místnosti, více v kapitole řešeného příkladu.

2.2.8 Diskové termoelektrické články

Diskové TC jsou dalším možným měřicím zařízením sloužícím pro měření teplot na neohřívaném povrchu. V normě [9] je popsána jejich konstrukce.

2.2.9 Diskové termoelektrické články – konstrukce

Konstrukce těchto měřících zařízení je zobrazena na obr. 15. Diskové TC se skládají z měděného disku o průměru 12 mm a tloušťce 0,2 mm, ke kterému se připájí větve TC typu K o průměru 0,5 mm. Dále je také povoleno používat TC, jejichž vodiče byly stočeny k sobě a potom připájeny k měděnému disku. Každý TC musí být překryt izolační krytkou na bázi silikátových vláken a klasifikovanou jako výrobek třídy reakce na oheň A1 nebo A2. Rozměry krytky jsou $\pm 0,5$ mm $30 \times 30 \times 2$ mm, materiál musí mít objemovou hmotnost 900 ± 100 kg/m³, pokud ve zkušebních normách není stanoveno jinak. Izolační krytky se nařezávají tak, aby obsáhly vodiče TC. Pokud jsou vodiče TC připájeny k disku odděleně, jako je vidět na obr. 15, tak může nařiznutí začínat v protilehlých rozích nebo v polovině délky protilehlých okrajů.



obr. 15: diskové TC [9]: (A) s nepřekrývajícími se vodiči, (B) s překrývajícími se vodiči

- 1 příklady nařiznutí krytky umožňující osazení přes měděný disk
- 2 příklad vložení pojiva mezi termoelektrický článek a zkušební vzorek
- 3 měděný disk a izolační krytka, přilepená k povrchu vzorku

2.2.10 Diskové termoelektrické články – připevnění

Disk nebo krytka musí kopírovat profil povrchu, proto se v případě nerovného povrchu zkušební vzorku musí upravit. Pro zajištění plného kontaktu musí být vytvořena hladká plocha o rozměrech 30×30 mm. Pokud to není možné, TC se připevní k povrchu pouze kolem okrajů disku pomocí keramického pojiva. Při obtížném připevňování standartní krytky se může její velikost zmenšit ve dvou rovnoběžných stranách, ale disk musí být pokryt.

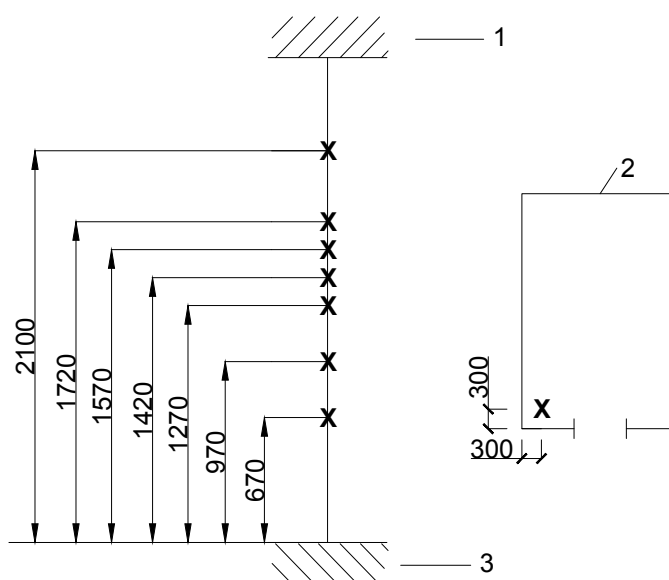
2.3 Způsoby instalace a připevnění termoelektrických článků pro zkoušku Room Corner Test

Instalace TC závisí na tom, jaké teploty jsou při měření požadovány – teploty plynu, teploty na površích stavebních výrobků nebo přímo v nich. Při měření teplot u stavebních výrobků je v obou případech důležité promyslet, jak a kam se TC připevní.

V této kapitole bude popsána instalace i způsob připevnění TC dle normy pro RCT [12] a dále shrnut experiment, kde bylo využito doporučené připevnění a další možnosti instalace a jaké byly pro jednotlivé metody získány výsledky, závěrem budou porovnány a vyhodnotí se vhodnost těchto metod pro RCT.

2.3.1 Instalace termoelektrických článků dle normových požadavků

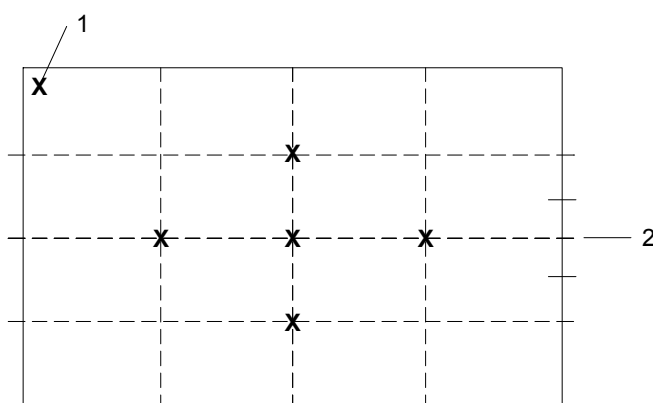
V normě věnované RCT [12] je popsáno umístění i typ TC pro měření teploty plynu i povrchové. Co se týče teploty plynu, pro její měření se používá tzv. strom termoelektrických článků (drát od podlahy po strop, na který jsou fixovány TC – obr. 16), který se nachází u dveřního otvoru. Aby byly chyby při měření teploty co nejmenší, měření se musí provádět s použitím sacích pyrometrů nebo dle normy velmi tenkých TC s průměrem $50 \mu\text{m} = 0,05 \text{ mm}$, což je rozměr téměř nesehnatelný (např. výrobce MAVIS Nový Bor s.r.o. ho ani nemá v nabídce, OMEGA Engineering dodává nejmenší TC typu K o průměru asi $76 \mu\text{m}$). V požární laboratoři na UCEEB ČVUT v Praze se používá TC od výrobce OMEGA Engineering plášťový typu K (do $1200 \text{ }^\circ\text{C}$) o průměru $0,5 \text{ mm}$. Další TC je umístěn v odtahovém potrubí v blízkosti rychlostní sondy – Pitotovy trubice – viz kapitola 2.4.2, která slouží pro měření rychlosti proudění plynu.



obr. 16: měření teploty plynu na stromu termoelektrických článků uvnitř požární komory [12]

1 – strop, 2 – umístění v místnosti, 3 – podlaha (rozměry uvedeny v milimetrech)

Měření povrchové teploty je možné pomocí TC umístěných na stropě, jejichž požadované umístění je zobrazeno na obr. 17. Pět jich je ve středové části stropu, šestý je v rohu umístěn nad hořákem. Co se týče rozměrů TC, jsou podstatně větší než u stromu, pod stropem průměr TC může být max. 0,25 mm, což je 5x větší průměr. Měřicí spoje TC jsou připevněny pomocí tenké a tepelně odolné pásky ze skleněných vláken, jejíž plocha je přibližně 100 mm² a pro dobrý kontakt mezi touto páskou a měřícím spojem TC je doporučeno udržovat teplotu alespoň 500 °C. Chyby v měření je těžké definovat, mohou být variabilní v čase a místě, a to z důvodu změn v konvekčním (konvekce – šíření tepla prouděním) a radiačním (radiace – šíření tepla zářením) prostředí ve zkušebně.



obr. 17: umístění povrchových termoelektrických článků na povrchu stropu [12]

1 – povrchový termoelektrický článek na povrchu stropu nad hořákem, 2 – dveřní otvor

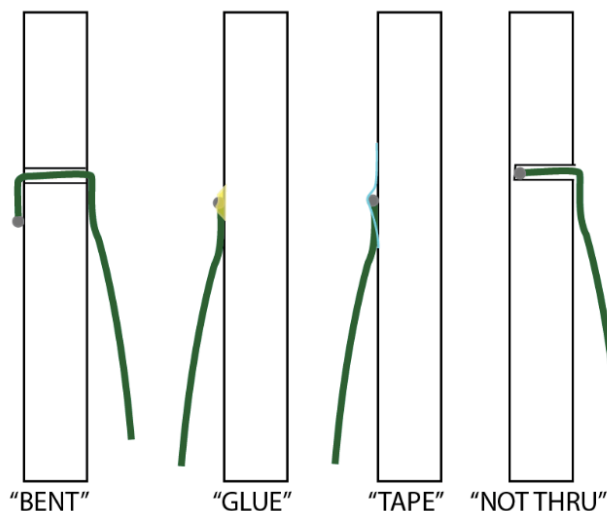
Co se týče dalších možností fixace termoelektrických článků, jsou možné další typy pásek – výše zmíněná páska ze skleněných vláken a např. hliníková páska v roli, která ale vydrží do 350 až 400 °C apod.

2.3.2 Instalace termoelektrických článků při experimentu ve Švédsku

Ve Švédsku, na Lund University, byl proveden experiment (viz odborný článek [13]), a to v podmínkách mini RCT, konkrétně v polovičních rozměrech RCT. Při experimentu mělo více skupin nezávisle na sobě naplánovat, uskutečnit, měřit a analyzovat vlastní požární experimenty. Konkrétně byly provedeny 3 testy, kdy jako palivo byla použita nádoba s heptanem umístěná uprostřed RCT. Hlavním cílem experimentu bylo spočítat rychlost uvolňování tepla (HRR) za použití teorie spotřeby kyslíku. Dalším cílem bylo zkoumání teplot při různém způsobu připevnění TC, a to jakým způsobem instalace ovlivnila povrchové teploty.

Při experimentu byly měřeny i teploty plynu, a to pomocí TC typu K. Při tomto měření teplot plynu bylo zjištěno, že čím větší průměr TC mají, tím pomalejší je odezva teploty, tedy pomaleji se zahřívají, což je způsobeno větší plochou danou větším průměrem, která se musí ohřát.

Co se týče teplot povrchových, byly měřeny při čtyřech různých typech umístění a připevnění, které jsou znázorněny na obr. 18:



obr. 18: metody měření povrchové teploty [13]

Ve všech instalovaných polohách byly TC umístěny na jeden kus materiálu a co nejbližší k sobě, aby se snížila pravděpodobnost chyb při měření kvůli poloze TC. Jako materiál, na který byly TC instalovány, byla použita deska Promatect®. Tyto desky se používají jako požárně ochranné stavební desky a jsou kalcium–silikátové. Rozměry použité desky byly následující – délka 60 cm, šířka 10 cm, tloušťka 1 cm. Mezi stěnu a tuto desku byla připevněna izolace, aby se zabránilo průniku horkých plynů na neexponovanou stranu desky a tím pádem nežádoucímu vlivu na instalované TC.

Metoda 1: “BENT“ – “ohnutí“

Tato metoda mohla být využita především díky tomu, že TC se mohou libovolně ohýbat. V tomto případě nebylo k připevnění použito jiného prostředku, do desky se pouze vyvrtal otvor cca o průměru 1–2 mm, do otvoru byl dán TC a zohýbán přibližně do tvaru “L“, který se umístil přímo na exponovaný povrch desky, jak je zobrazeno na obr. 18.

Metoda 2: “GLUE“ – “přilepení“

Při této metodě bylo použito tepelně odolné dvousložkové epoxidové lepidlo, které připevnilo měřicí konec TC na exponovanou stranu desky.

Metoda 3: “TAPE“ – “páska“

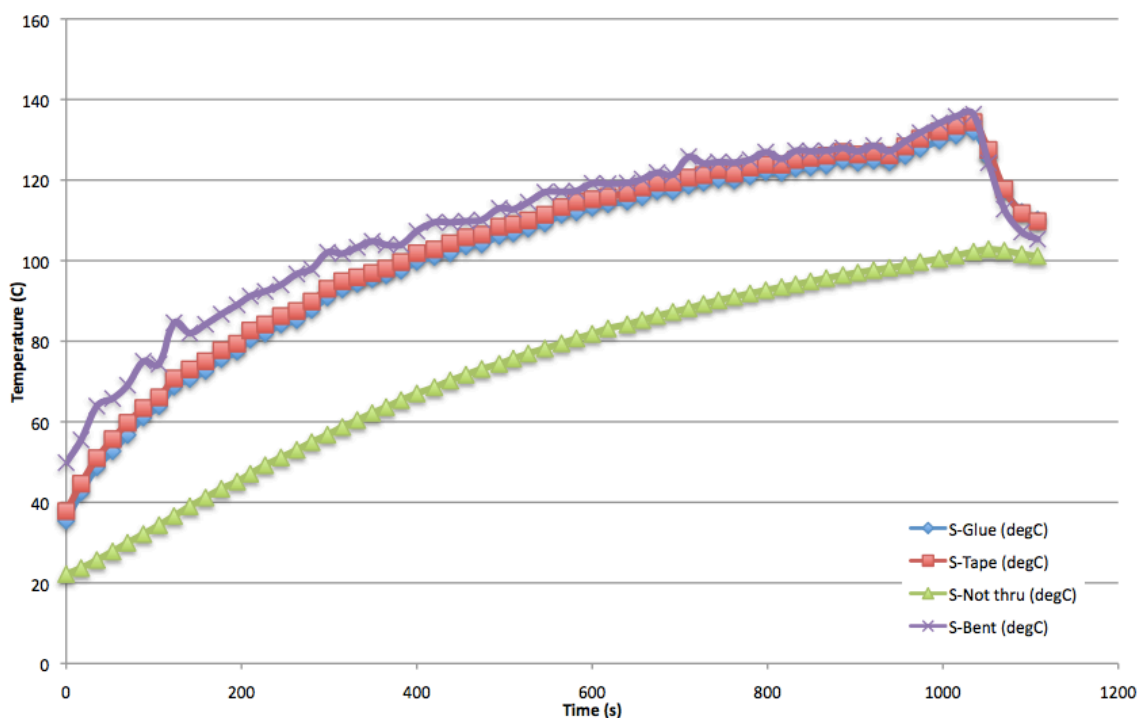
TC byl připevněn ve stejné poloze jako při metodě 2, v tomto případě tepelně odolnou páskou.

Metoda 4: “NOT THRU“ – “ne skrz“

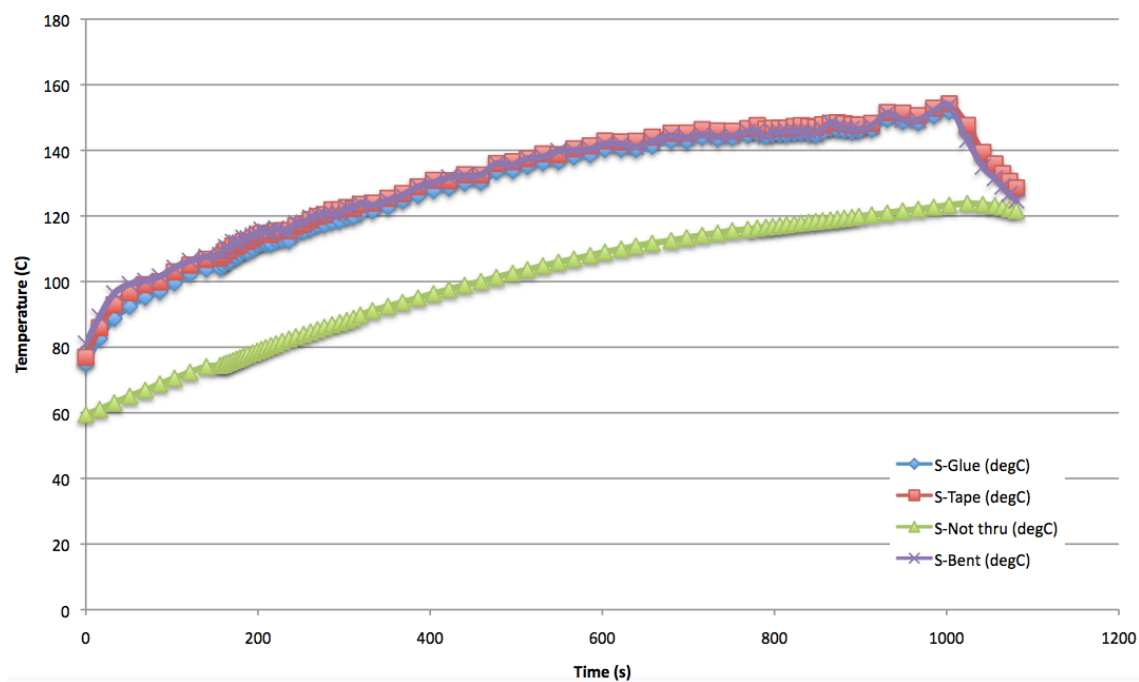
Stejně jako u metody 1 se do montážní desky vyvrtal otvor, jen ne úplně skrz desku až do exponované strany. Mezi otvorem a druhou stranou zůstala vrstva desky tloušťky přibližně

1–2 mm. Do otvoru se umístil TC a páskou byl upevněn na neexponované straně, aby setrval ve své poloze.

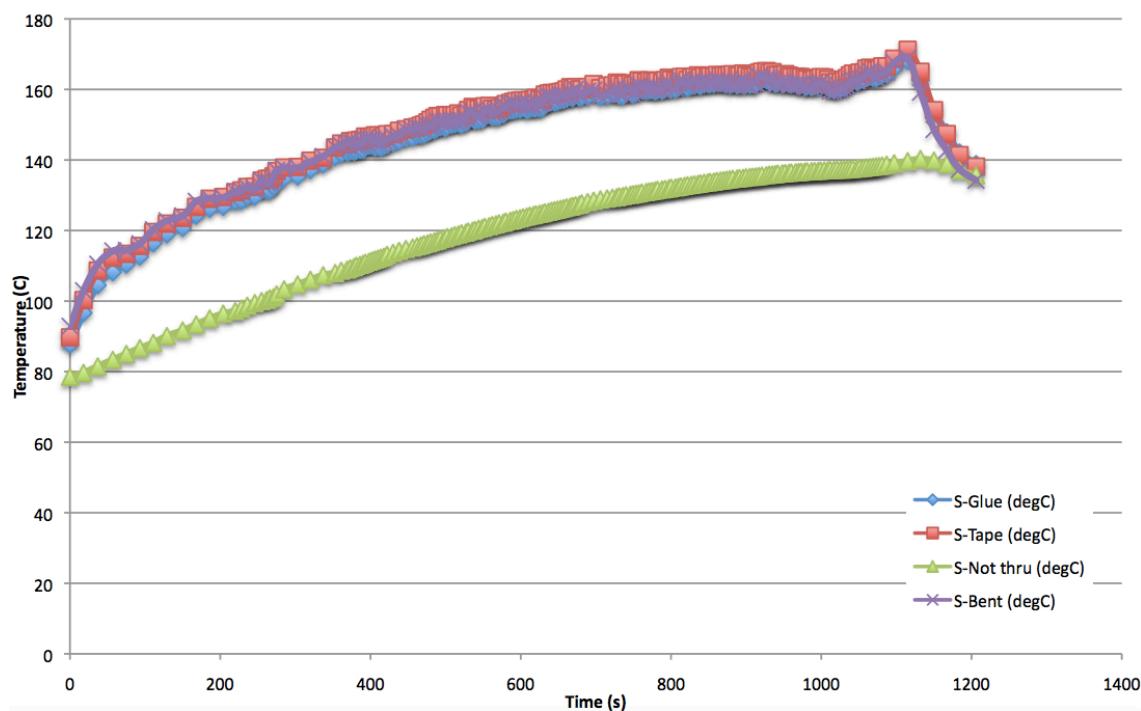
Výše popsané instalované TC byly zkušeny celkem třikrát a výsledky jsou zobrazeny na následujících třech obrázcích – obr. 19, obr. 20, obr. 21:



obr. 19: Test 1: Měření povrchové teploty [13]



obr. 20: Test 2: Měření povrchové teploty [13]



obr. 21: Test 3: Měření povrchové teploty [13]

Na všech obrázcích lze pozorovat, že TC “NOT THRU“ dosahuje nejnižších teplot, a to z toho důvodu, že nebyl vystaven přímému působení tepla, tudíž ho ohřálo pouze teplo vedené ve stěně desky. Mezi zbylými TC nejsou z výše uvedených obrázků patrné téměř žádné rozdíly, proto byla provedena další analýza, kdy se porovnaly mezi sebou vždy dva TC (už bez TC “NOT THRU“). Výstupy porovnávání zobrazeny v grafech jsou součástí vědeckého článku [13], zde je z důvodu velkého množství dat pouze slovní shrnutí zjištěných poznatků:

- teploty na začátku testů 2 a 3 byly postupně vyšší, což znamená, že TC nebyly ochlazeny na teplotu, při které začínalo měření v testu 1
- jak bylo zmíněno výše, TC “NOT THRU“ dosahoval nejnižších teplot, a to při rozdílu od ostatních v rozmezí přibližně 20 až 30 °C
- rozdíly teplot mezi zbylými třemi TC – “BENT“, “GLUE“ a “TAPE“ se lišily o cca 18 °C
- při testu 1 TC “BENT“ udával vyšší teploty oproti dvěma zbylým TC “GLUE“ a “TAPE“, ale při každém dalším testu se rozdíl snižoval
- rozdíly mezi TC “GLUE“ a “TAPE“ měly při všech testech téměř konstantní hodnotu
- v testu 3 dosahoval TC “TAPE“ vyšších teplot než TC “BENT“
- po ukončení testu (ukončení hoření) si delší dobu zachovávaly teplotu TC “GLUE“ a TC “TAPE“

Mezi naměřenými hodnotami na TC “BENT“, “GLUE“ a “TAPE“ se při každém testu rozdíly snižovaly. Na začátku se očekávalo, že požáru nejvíce vystavený TC “BENT“ bude dosahovat teplot nejvyšších, jelikož měřící konec TC byl vystaven přímo (bez překrytí lepidlem nebo páskou), což se při testu 1 potvrdilo, v dalších testech ale už rozdíl mezi TC

s měřicími konci překrytými lepidlem nebo páskou nebyl tak markantní, při testu 3 dokonce vyšších teplot dosahoval TC překrytý páskou – “TAPE“, což bylo odůvodněno tím, že došlo k tepelné degradaci pásky. Další faktory, které se nezdají tak směrodatné, mohou být přičítány změnám ve vrstvě kouře, prostoru mezi jednotlivými TC nebo chybě měření. Přesto je stále nejpravděpodobnější právě tepelná degradace izolací, která zapříčinila pomalejší rozptýlení tepla, tím pádem „zpoždění“ při chlazení takto připevněných TC.

Závěr 1 – testy dokázaly, že způsob i místo připevnění TC má vliv na naměřené hodnoty teplot, ale nevyřešilo se, která z metod je nejvhodnější, což by mohlo být vyřešeno např. matematickým modelem.

Závěr 2 – pro měření povrchových teplot v RCT nejsou uvedené 2 ohýbací metody vhodné (“BENT“, “NOT THRU“), a to z toho důvodu, že by bylo nutné provrtání stropu – vhodnější jsou tedy např. pro zkoušení obkladů, kdy by bylo možné předem vyvrtat otvory a poté připevnit obklad do místnosti, což je také náročné a navíc je zde pravděpodobnost získat nepřesnější výsledky z důvodu narušení prvků.

2.4 Rychlost proudění plynů

Rychlost proudění v [m/s] je parametr závislý na objemovém (Q) nebo hmotnostním (m) průtoku, stručně řečeno jde o určitou vzdálenost, kterou urazí nějaká částice za jednotku času.

$$\bullet \quad v = \frac{Q}{S} \quad [m/s] \quad (1)$$

$$\text{kde:} \quad Q \quad \text{objemový průtok} \quad [m^3/s]$$

$$S \quad \text{průtočná plocha} \quad [m^2]$$

$$\bullet \quad v = \frac{m}{\rho \cdot S} \quad [m/s] \quad (2)$$

$$\text{kde:} \quad m \quad \text{hmotnostní průtok} \quad [kg/s]$$

$$\rho \quad \text{hustota tekutiny} \quad [kg/m^3]$$

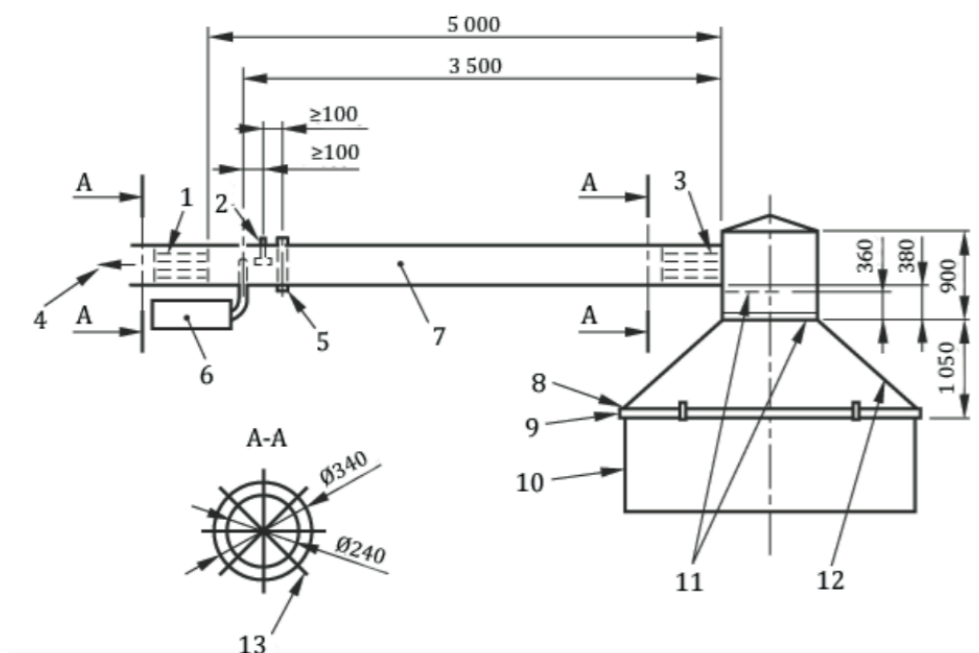
Proudění může být laminární nebo turbulentní. Při laminárním proudění se částice pohybují uspořádaně, a to po vzájemně rovnoběžných drahách – proudových vrstvách. Rychlostním profilem laminárního proudění je parabola. Opakem je turbulentní proudění, kterého je obvykle dosahováno při vyšších rychlostech a proudové vrstvy se promíchávají. Rychlostní profil je podobný rovnoměrnému. Rozhraní mezi těmito typy proudění vyjadřuje Reynoldsovo číslo Re , což je bezrozměrný parametr vyjadřující poměr mezi setrvačnými a třecími silami. Při laminárním proudění nepřesáhne Re kritickou hodnotu 2 320, při překročení hovoříme už o proudění turbulentním. Výpočet Re je uveden v rovnici (8).

2.4.1 Metody měření průtoku

Metody měření průtoku mohou být objemové, hmotnostní a rychlostní. Objemové měření průtoku je založeno na principu měření objemu tekutiny v odměrných prostorách, které se v cyklech plní a vyprazdňují. Právě počet cyklů je konečným měřítkem. Při hmotnostním měření průtoku se měří veličina přímoúměrná hmotnostnímu průtoku. Poslední metodou je rychlostní měření průtoku, kdy se využívají např. průtokoměry s měřením rozdílu tlaků (rychlostní sondy), měří se rychlost tekutiny a poté se pomocí známého profilu průtoku vypočítá objemový průtok.

2.4.2 Pitotova trubice

Pitotova trubice je jednou z nejjednodušších rychlostních sond založena na měření rozdílu tlaku, pracuje na principu závislosti dynamického tlaku tekutiny na rychlosti proudění. Při použití v RCT je umístěna v odtahovém potrubí na obr. 22. Přímou u ní je umístěn také TC o max. průměru 1,6 mm, který měří teplotu plynu.

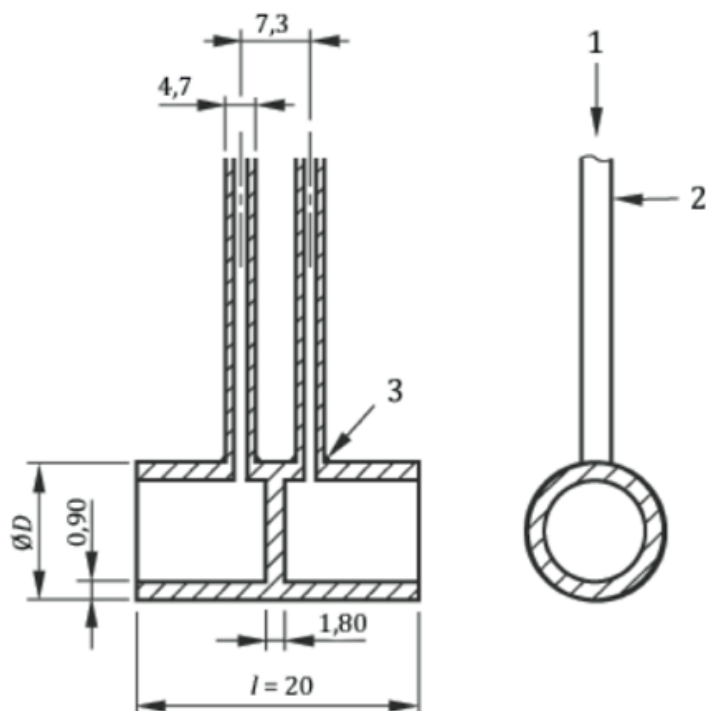


obr. 22: podrobnosti o odtahovém zařízení pro RCT a umístění vzorkovacích sond [12]

(rozměry uvedeny v milimetrech)

1	vodicí lopatky	8	otvory (3 000 mm × 3 000 mm)
2	Pitotova trubice	9	rám z ocelového profilu (50 mm × 100 mm × 3,2 mm)
3	vodicí lopatky	10	ocelové plechy (1 000 mm × 3 000 mm)
4	čištění výfukových plynů	11	ocelové desky (2 mm × 500 mm × 900 mm)
5	lampa, fotobuňka	12	zvon – ocelové desky tl. 2 mm
6	analýza plynů	13	čtyři ocelové desky (395 mm × 400 mm)
7	odtahové potrubí (průměr 400 mm)		

Průtok v odtahovém potrubí popsaném na obr. 22 je měřen obousměrnou sondou znázorněnou na obr. 23, která je umístěna ve středové ose odtahového potrubí. Tato obousměrná sonda se skládá z nerezového válce o délce 32 mm a o vnitřním průměru 14 mm. Válec je rozdělen vnitřní přepážkou na dvě stejné komory, rozdíl tlaků mezi nimi se měří tlakovým převaděčem. Propojení sondy s tlakovým převaděčem zajišťují kovové duté trubice (jedna nad a druhá pod přepážkou). Princip funkce je takový, že proudící vzduch, který vstupuje do sondy z jedné či druhé strany, vyvolá skrz trubice změnu tlaku v převaděči a ten poskytuje výstupní signál jako změnu elektrického napětí.



obr. 23: obousměrná sonda – 1 rozdíl tlaků, 2 trubička pro spojení s převaděčem tlaku s proměnnou délkou, 3 svar [12]

(rozměry uvedeny v milimetrech)

Obousměrná sonda snímá statický a celkový tlak, který je součtem tlaku statického a dynamického. Všeobecně platí následující zjednodušené vztahy převzaty z [14]:

$$\bullet \quad p_c = p_s + p_d = p_s + \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad [Pa] \quad (3)$$

kde: p_c celkový tlak $[Pa]$

p_s statický tlak $[Pa]$

p_d dynamický tlak $[Pa]$

ρ hustota tekutiny $[kg/m^3]$

v rychlost proudění tekutiny $[m/s]$

$$\bullet \quad v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_d)}{\rho}} \quad [m/s] \quad (4)$$

Jak je vidět, dynamický tlak p_d je neznámou v obou vzorcích, tudíž se pro výpočet musí použít iterační postup, tedy do vzorců dosazovat odhadované hodnoty do té doby, než se výsledky obou rovnic sobě budou rovnat. Co se týče uvedené veličiny – hustota tekutiny ρ , ta je závislá na teplotě, jedná se tedy o proměnný parametr – viz tab. 5.

tab. 5: fyzikální hodnoty pro suchý vzduch při tlaku 100 kPa⁴

t [°C]	ρ [kg/m ³]	c [J/(kg.K)]	$\lambda \cdot 10^2$ [W/(m.K)]	$a \cdot 10^6$ [m ² /s]	$\mu \cdot 10^6$ [Pa.s]	$v \cdot 10^6$ [m ² /s]	Pr	α [10 ⁻³ /K]
-100	2,012	1022	1,62	7,88	11,8	5,86	0,744	-
-50	1,561	1013	2,04	12,9	14,6	9,35	0,727	-
-20	1,376	1009	2,26	16,28	16,3	11,85	0,727	3,962
0	1,275	1005	2,37	18,50	17,2	13,49	0,727	3,671
10	1,230	1005	2,45	19,82	17,8	14,47	0,727	-
20	1,188	1010	2,52	21,0	18,2	15,32	0,727	3,419
40	1,112	1013	2,65	23,53	19,2	17,27	0,727	3,200
60	1,046	1017	2,80	26,32	20,1	19,22	0,727	3,007
80	0,986	1020	2,93	29,13	21,0	21,30	0,727	2,836
100	0,934	1022	3,07	32,16	21,8	23,34	0,727	2,684
120	0,886	1024	3,20	35,27	22,8	25,73	0,727	-
140	0,843	1027	3,33	38,46	23,5	27,88	0,727	-
160	0,804	1030	3,44	41,54	24,1	29,98	0,727	-
180	0,769	1034	3,57	44,90	25,0	32,51	0,727	-
200	0,736	1037	3,70	48,48	25,9	35,19	0,727	-
250	0,666	1044	3,98	57,30	28,3	42,04	0,727	-
300	0,608	1049	4,29	67,39	29,7	48,85	0,727	-
350	0,559	1055	4,57	77,49	31,5	56,35	0,727	-
400	0,517	1059	4,81	87,85	33,0	63,83	0,727	-
500	0,451	1072	5,40	111,7	36,2	80,27	0,727	-
600	0,399	1089	5,82	133,9	39,2	98,25	0,730	-
800	0,325	1114	6,69	184,8	44,5	136,9	0,735	-
1000	0,274	1139	7,62	244,2	49,5	180,7	0,740	-

ρ - měrná hmotnost, c - měrná tepelná kapacita, λ - součinitel tepelné vodivosti, a - součinitel teplotní vodivosti, μ - dynamická viskozita, v - kinematická viskozita, Pr - Prandtlovo číslo, α - součinitel objemové roztažnosti

V normě [12] je uveden vztah, který není obecný, platí pouze pro místo s Pitotovou trubicí v odtahovém potrubí. Slouží pro výpočet \dot{V}_{298} – objemového průtoku v obousměrné sondě

⁴ dostupné na www.tzb-info.cz

na obr. 23, je vyjádřen v m^3/s , vztažen na atmosférický tlak a okolní teplotu $25\text{ }^\circ\text{C}$. Vztahy uvedené v normě [12] mají následující tvar:

$$\dot{V}_{298} = \left(\frac{Ak_t}{k_p}\right) \times \frac{1}{\rho_{298}} \times \left(\frac{2\Delta p T_0 \rho_0}{T_s}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$= 22,4 \left(\frac{Ak_t}{k_p}\right) \left(\frac{\Delta p}{T_s}\right)^{1/2} \quad (6)$$

kde: T_s *teplota plynu v odtahovém potrubí* [K]

T_0 273,15 K

Δp *tlakový rozdíl měřený obousměrnou sondou* [Pa]

ρ_{298} *hustota vzduchu při $25\text{ }^\circ\text{C}$ a atm. tlaku* [kg/m^3]

ρ_0 *hustota vzduchu při $0\text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku 0,1 MPa* [kg/m^3]

A *plocha průřezu odtahového potrubí* [m^2]

k_t *kalibrační konstanta*

- *poměr průměrného hmotnostního průtoku na jednotku plochy k hmotnostnímu průtoku na jednotku plochy ve středu odtahového potrubí*

k_p *Reynoldsova číselná korekce pro obousměrnou sondu, kterou navrhli*

McCaffrey a Heskestad; ve výfukových plynech jsou podmínky v potrubí takové, že Re je obvykle větší než 3 800, a proto může být k_p považováno za konstantní a rovno 1,08

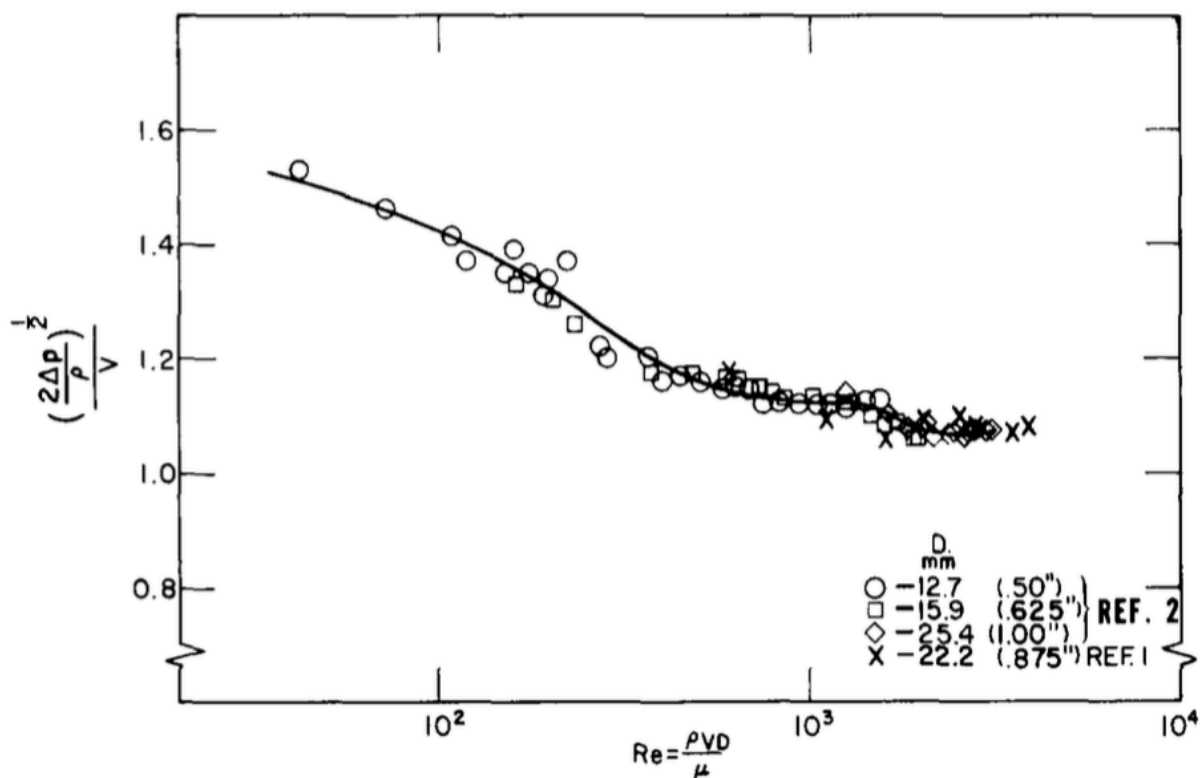
Teplota plynu v odtahovém potrubí T_s je měřena instalovaným TC v blízkosti obousměrné sondy, součinitel k_t je dán aerodynamikou vzduchotechnického systému v laboratoři, směrem ke kraji klesá, odhadem je 0,9 a závisí na proměření potrubí. Součinitel k_p vyjadřuje stručně řečeno viskozitu.

Vzorec (5) předpokládá, že změny hustoty v plynech vzniklých při spalování (ve vztahu ke vzduchu) jsou způsobeny pouze zvýšením teploty. Opravy kvůli změněnému chemickému složení nebo obsahu vlhkosti mohou být ignorovány kromě studií o procesu hašení vodou. Kalibrační konstanta k_t se stanoví měřením teploty a průtokového profilu uvnitř odtahového potrubí podél průřezu. Několik sérií měření by mělo být prováděno s reprezentativními hmotnostními toky a s proudy teplého i studeného plynu. Chyba při určování faktoru k_t by neměla překročit $\pm 3\%$.

Obousměrná tlaková sonda je dávana do souvislosti i s Reynoldsovým číslem. Na obr. 24 je porovnán výstup ze sondy a Reynoldsovo číslo a zobrazeny příslušné vzorce v osách grafu. Hodnota D [mm] je vnitřní průměr rychlostní sondy. Pomocí počítače

je dosaženo polynomiální křivky pro zobrazené body vztahem (7), který platí pro Re v rozmezí 40 až 3800:

$$\begin{aligned} \frac{(2\Delta p/\rho)^{1/2}}{v} &= 1,533 - 1,366 \times 10^{-3} Re \\ &+ 1,688 \times 10^{-6} Re^2 - 9,706 \times 10^{-10} Re^3 \\ &+ 2,555 \times 10^{-13} Re^4 - 2,484 \times 10^{-17} Re^5 \end{aligned} \quad (7)$$



obr. 24: hodnoty získané obousměrnou sondou versus Reynoldsovo číslo [15]

Reynoldsovo číslo lze spočítat vztahem (8) uvedeným v [16], kdy hodnota rychlosti proudění v je dána odhadem, jelikož pro její výpočet je nutné znát právě počítané Reynoldsovo číslo. I v tomto případě je nutné použít iterační postup, tedy odhadnout rychlost proudění v , spočítat ji pomocí vhodných vzorců, např. (5) a (6), a následně porovnávat získané hodnoty, jejichž rozdíl by se měl blížit nule. K takovému postupu je nejvýhodnější využít tabulkový procesor, např. Microsoft Excel a nadefinovat makro pro iterační výpočet.

$$Re = \frac{353 \cdot v \cdot D}{T \cdot \mu} \quad (8)$$

kde:	Re	Reynoldsovo číslo	[-]
	v	rychlost proudění	[m/s]
	D	vnitřní průměr rychlostní sondy	[mm]
	T	teplota vzduchu	[°R]
	μ	dynamická viskozita vzduchu při dané teplotě vzduchu	[centipoise]

1 centipoise = 0,001 kg/m/s

$$\mu = \mu_o \cdot \frac{0,555 \cdot T_o + C}{0,555 \cdot T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_o}\right)^{3/2} \quad (9)$$

kde:

$\mu_o = 0,01827$ referenční viskozita vzduchu při referenční teplotě T_o

$T_o = 524,07$ °R (stupeň Rankina) – referenční teplota

(konstanta pro standardní vzduch)

T teplota měřená v blízkosti rychlostní sondy [°R]

$C = 120$ Sutherlandova konstanta [-]

Co se týče dalšího využití obousměrné tlakové sondy, v RCT slouží i pro měření hmotnostního průtoku skrz otvory, dále pro měření objemového průtoku. Při těchto měřeních však neplatí uvedené vzorce (5) a (6) – využitelné jen pro odtahové potrubí.

Vedle pitotových trubic lze měřit rychlost proudění plynu např. anemometry, které mají ale omezenější možnosti použití, protože je obvykle nelze použít při vysokých teplotách, kterých je při požárních zkouškách dosahováno a ve kterých mají tím pádem pitotovy trubice nezastupitelnou roli.

3 Experimentální ověření

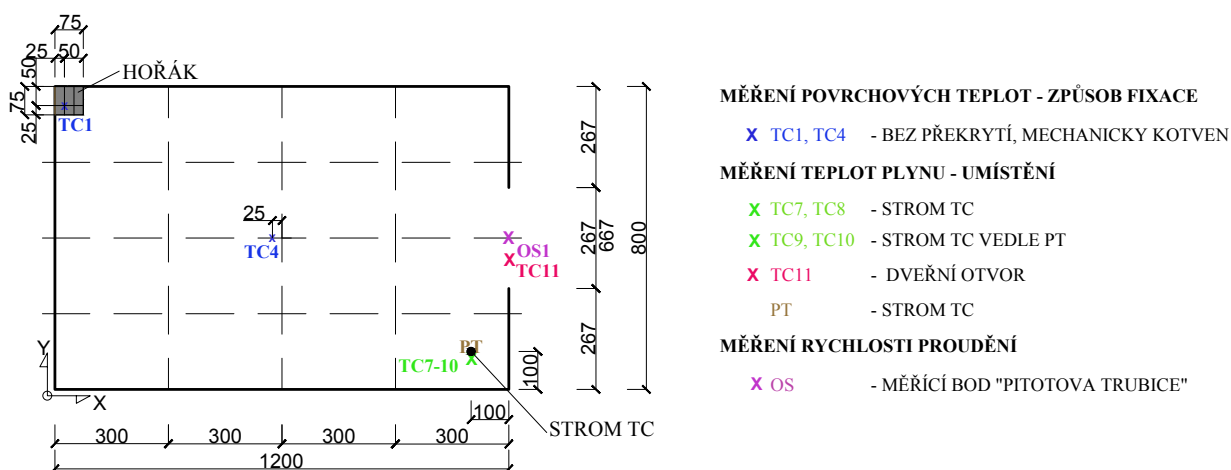
Cílem experimentálního ověření je vytvořit dva matematické modely a provést jeden požární experiment, který bude sloužit k validaci. Matematické modely se liší tím, že v otvoru v obvodové stěně je jednou v části otvor překryt deskou z minerální izolace a jednou ne, což má ukázat vliv přístupu kyslíku, odvodu kouře a posunu neutrální roviny. Při experimentu otvor překryt je – matematický model měl zajímavější výsledky, ve většině případů ukazovala měřící zařízení vyšší teploty i rychlost proudění a vizualizace ukazovala více plamenného hoření i prošlehávání plamenů ven z otvoru.

V matematických modelech i požárním experimentu se zkoumají povrchové teploty pod stropem pomocí TC o stejném průměru, teploty plynu také pomocí TC, ale už o dvou různých průměrech, a dále se teplota plynu měří pomocí PT. V otvoru v obvodové stěně je umístěno zařízení pro měření rychlosti proudění plynu. Výpočtem v programu FDS 6.6.0 se získá rychlost proudění plynu rovnou v m/s, ale při požárním experimentu jsou výsledky udávány v Pa, proto je nutný ještě přepočít pro získání rychlosti proudění plynu v m/s, princip byl popsán v předchozí kapitole 2.4. Požární experiment se navíc liší tím, že při měření povrchových teplot pod stropem jsou TC různě přichyceny a je jich tam více – nad hořákem tři a stejně tak uprostřed stropu. V matematickém modelu je na obou místech pouze jeden TC, a to z toho důvodu, že v experimentu se u TC zkoumá i vliv přichycení na měření teplot, což by při matematickém modelu dávalo zkreslené výsledky, které by byly pro porovnávání s experimentem bezpředmětné. Seznam všech měřících zařízení včetně umístění i velikosti je shrnut v tab. 6.

tab. 6: seznam měřících zařízení včetně umístění i velikosti

Typ / číslo	Průměr / rozměr [mm]	Měření	Umístění	Poznámka
TC1	3,0	teploty povrchové	nad hořákem vlevo	bez fixace
TC2			nad hořákem uprostřed	fixace Nefalit + lepidlo
TC3			nad hořákem vpravo	fixace hliníková páska
TC4			střed stropu vlevo	bez fixace
TC5			střed stropu uprostřed	fixace Nefalit + lepidlo
TC6			střed stropu vpravo	fixace hliníková páska
TC7	1,5	teploty plynu	strom TC	vedle sebe
TC8	3,0			u PT
TC9	1,5			
TC10	3,0		otvor	vedle OS
TC11	1,5			
PT	100 x 100		strom TC	
OS		rychlosti proudění (model) / tlaku (požární experiment)	otvor	

Co se týče rozmístění měřicích zařízení, na stropě ze spodní strany jsou umístěny dva termoelektrické články o stejném průměru 3 mm – jeden nad hořákem (TC1), jeden uprostřed stropu místnosti (TC4, posunut o 25 mm blíže k hořáku v ose X z důvodu přesnější podoby s požárním experimentem). Strop i půdorys místnosti jsou zobrazeny na obr. 26 a popis znázorněných měřicích zařízení je vedle obrázku i v tab. 6.



obr. 26: půdorys zkušební místnosti pro matematické modely včetně měřicích zařízení pod stropem, na stromu a v otvoru

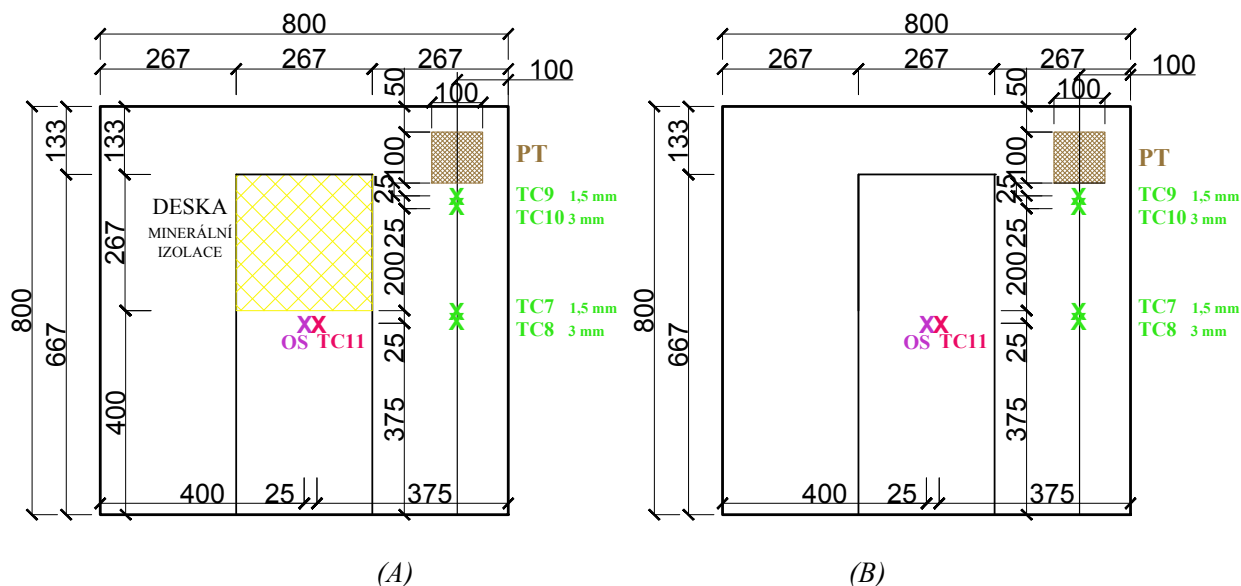
Další termoelektrické články jsou umístěny na stromu TC (zobrazen v rohu na obr. 26), kde jsou vedle sebe v každém místě zadefinovány TC dva o různých průměrech – menší má průměr 1,5 mm, větší 3 mm (stejně jako TC na stropě). Tyto TC jsou umístěny ve výškách od podlahy:

- 375 mm TC8 o průměru 3,0 mm
- 400 mm TC7 o průměru 1,5 mm
- 600 mm TC10 o průměru 3,0 mm
- 625 mm TC9 o průměru 1,5 mm

Dále je na stromu umístěn deskový snímač teploty pro pozorování rozdílu mezi jeho měřením a měřením termoelektrických článků. Jeho rozměr je 100 x 100 mm a dolní okraj je umístěn o 25 mm nad posledním TC9, tedy ve výšce 650 mm nad podlahou, končí ve výšce 750 mm nad podlahou a od stropu je vzdálen 50 mm.

Dalším měřicím zařízením (v modelu zadefinováno pomocí příkazu – měřicího bodu, nemodeluje se) je rychlostní obousměrná sonda – pitotova trubice (značena jako OS) pro měření rychlosti proudění plynu. Je zadefinována uprostřed otvoru (dle osy Y) a ve výšce 375 mm nad podlahou, vedle které je o 25 mm ve směru osy Y k počátku umístěn další TC11 o průměru 1,5 mm. TC11 je ve stejné výšce jako OS i TC8, tedy ve výšce 375 mm nad podlahou. V půdorysu je i OS a TC11 vidět na obr. 26.

Všechna zde popsaná měřicí zařízení jsou zobrazena v pohledu z vnitřní strany místnosti na obr. 27.

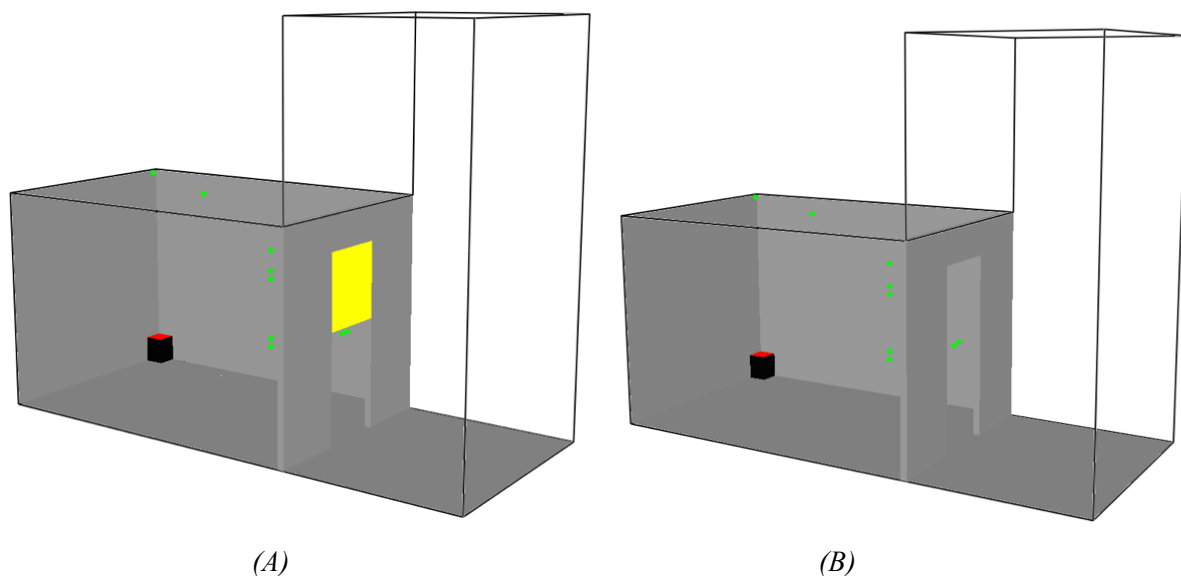


obr. 27: pohled z vnitřní strany místnosti na stěnu s otvorem: (A) provedení použité pro matematický model s deskou z minerální izolace ve dveřním otvoru a pro požární experiment, (B) matematický model bez desky z minerální izolace ve dveřním otvoru

Celkem je tedy v každém modelu zadefinován následující počet měřicích zařízení o daných rozměrech a daném umístění:

- 2x TC o průměru 3,0 mm pro měření povrchových teplot
- 2x TC o průměru 3,0 mm na stromu pro měření teplot plynu
- 2x TC o průměru 1,5 mm na stromu pro měření teplot plynu
- 1x PT o rozměrech 100 x 100 mm na stromu pro měření teplot plynu
- 1x TC o průměru 1,5 mm vedle OS pro měření teplot plynu
- 1x OS ve dveřním otvoru pro měření rychlosti proudění plynu

Po sepsání zdrojového kódu je pomocí programu Smokeview 6.6.0 umožněna vizualizace namodelované místnosti včetně měřicích zařízení (zelené body) i propanového hořáku v rohu. Vizualizace obou modelů je zobrazena na obr. 28.



obr. 28: vizualizace matematických modelů pomocí programu Smokeview 6.6.0:
(A) s deskou z minerální izolace, (B) bez desky z minerální izolace

Simulace pro každý model je provedena jedna a trvá 25 minut, kdy se výkon propanového hořáku zmenšený na 1/9 oproti normovému mění s časem následovně:

- 0 – 10 min výkon 100 kW /9 = 11,1 kW
- 11 – 20 min výkon 300 kW /9 = 33,3 kW
- 21 – 25 min vypnutí hořáku, chladnutí

Volba tohoto výkonu propanového hořáku je zdůvodněna v úvodu této kapitoly.

3.2 Výsledky z matematických modelů

Po proběhnutí obou výpočtů se vytvořily soubory tabulek se spočtenými hodnotami, které jsou zobrazeny a vzájemně porovnány textově i graficky v této části, v tab. 7 jsou shrnuty nejdůležitější teploty, tedy maximální teploty a v jakém čase nastaly a dále teploty na konci výpočtu, tedy v čase 1500 s. Indexy u měřících zařízení říkají, pro jaký model byla zařízení použita: “bd” – bez desky, “sd” – s deskou.

tab. 7: shrnutí nejdůležitějších dosažených teplot v obou matematických modelech

Zařízení	Měření	Průměr / rozměr [mm]	Maximální teplota [°C]	Čas, kdy je dosaženo max. teploty [s]	Teplota na konci měření [°C]
<i>TC1_{bd}</i>	teploty povrchové	3 mm	950	1128	146
<i>TC1_{sd}</i>			852	1197	251
<i>TC4_{bd}</i>			648	1148	174
<i>TC4_{sd}</i>			605	1202	224
<i>TC7_{bd}</i>	teploty plynu	1,5 mm	194	1184	71
<i>TC7_{sd}</i>			437	1194	144
<i>TC8_{bd}</i>		3 mm	170	1200	77
<i>TC8_{sd}</i>			417	1203	147
<i>TC9_{bd}</i>		1,5 mm	472	1187	110
<i>TC9_{sd}</i>			462	1199	208
<i>TC10_{bd}</i>		3 mm	443	1188	111
<i>TC10_{sd}</i>			445	1203	210
<i>TC11_{bd}</i>		1,5 mm	103	1199	52
<i>TC11_{sd}</i>			426	1202	128
<i>PT_{bd}</i>		100 x 100	378	1185	165
<i>PT_{sd}</i>			403	1194	198

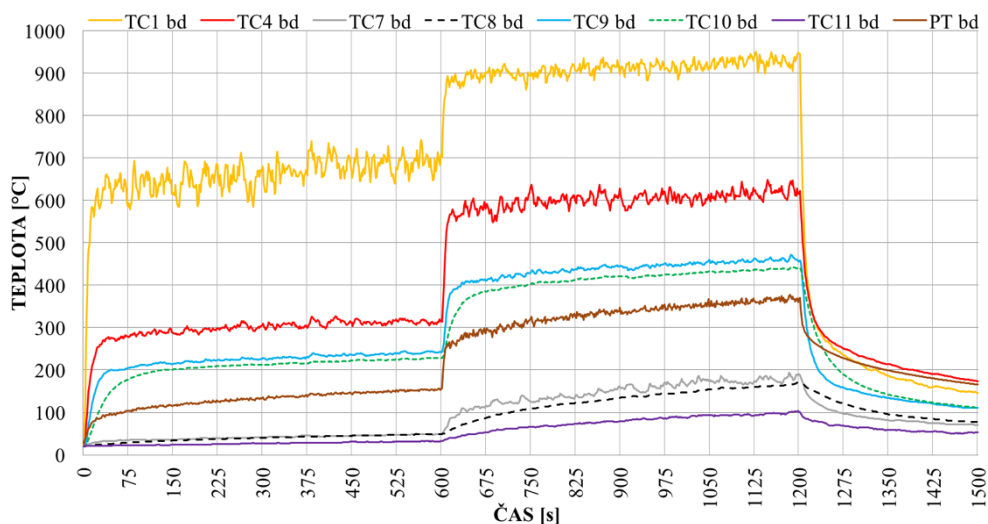
V tab. 8 jsou shrnuty další sledované hodnoty, a to rychlosti proudění plynu v obousměrných rychlostních sondách.

tab. 8: shrnutí nejdůležitějších dosažených rychlostí proudění v obou matematických modelech

Zařízení	Měření	Maximální rychlost proudění [m/s]	Čas, kdy je dosaženo max. rychl. pr. [s]	Rychl. proudění na konci měření [m/s]
<i>OS_{bd}</i>	rychlost proudění	0,50	1190	0,18
<i>OS_{sd}</i>		1,85	1083	0,83

3.2.1 Matematický model bez desky ve dveřním otvoru

Na obr. 29 jsou znázorněny průběhy na všech měřicích zařízeních pro měření teplot povrchových i plynu, kdy skoky zapříčiňuje zvýšení výkonu hořáku na maximum a další skok jeho vypnutí před fází chladnutí. Podrobněji jsou tyto průběhy popsány dále.

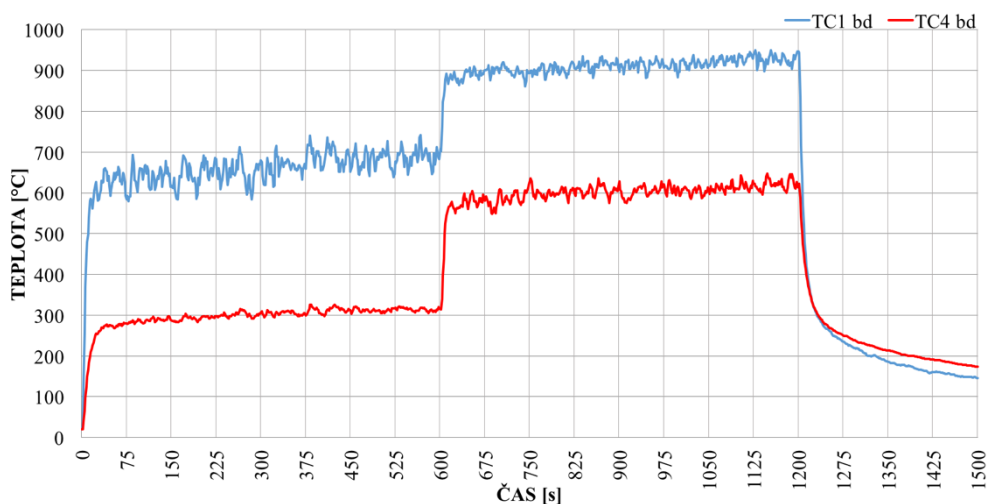


obr. 29: teploty na všech TC i PT v matematickém modelu bez desky

Jako první bude porovnán průběh teplot na TC s průměrem 3 mm měřicích povrchové teploty na stropě, na nichž byly zaznamenány následující hodnoty:

- TC1_{bd} max. teplota 950 °C v čase 1128 s 146 °C na konci měření
- TC4_{bd} max. teplota 648 °C v čase 1148 s 174 °C na konci měření

Na obr. 30 je na první pohled značný rozdíl mezi teplotami při zapnutém hořáku, TC1_{bd} dosahuje vyšších hodnot, protože byl přímo ovlivňován a zahříván plamenem, ale po vypnutí hořáku tento vliv ustal a tím začala teplota klesat rychleji než u TC4_{bd}.

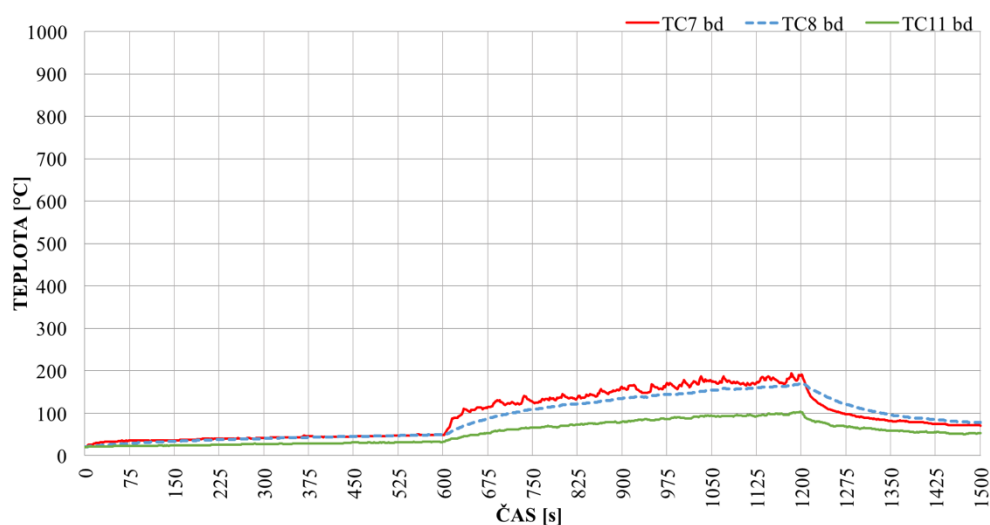


obr. 30: průběh teplot na TC měřicích povrchové teploty v modelu bez desky – TC1_{bd} a TC4_{bd}

Dále v matematickém modelu byly umístěny TC na stromu ve dvou výškových úrovních, v úrovni blíže k podlaze byly ve výšce 400 mm a 375 mm nad podlahou zdefinovány TC7_{bd} o průměru 1,5 mm a TC8_{bd} o průměru 3 mm. Ve stejné výškové úrovni jako TC8_{bd}, tedy 375 mm nad podlahou a posunut od středu o 25 mm ve směru osy Y směrem k počátku byl TC11_{bd} o průměru 1,5 mm. Hodnoty teplot plynu na těchto TC jsou:

- TC7_{bd} max. teplota 194 °C v čase 1184 s 71 °C na konci měření
- TC8_{bd} max. teplota 170 °C v čase 1200 s 77 °C na konci měření
- TC11_{bd} max. teplota 103 °C v čase 1199 s 52 °C na konci měření

Teploty u těchto TC nejsou tak vysoké, protože jsou v nižší poloze v místnosti, kde proudí studenější vzduch z exteriéru a ochlazuje TC. Průběhy teplot na obr. 31 se u TC na stromu v první fázi při třetinovém výkonu hořáku překrývají, po zapnutí hořáku na plný výkon ve fázi druhé dosahuje vyšších teplot TC7_{bd}, což je díky menšímu průměru a tím i menší ploše potřebné k ohřátí, což naopak po vypnutí hořáku zapříčiňuje i rychlejší chladnutí a nižší teploty oproti TC8_{bd}, ale na konci měření jsou teploty téměř stejné, rozdíl jen o 6 °C. Po celou dobu dosahoval TC11_{bd} teplot nejnižších, důvodem je to, že byl nejvíce vystaven vlivům proudění především chladného vzduchu do místnosti v této výškové úrovni.

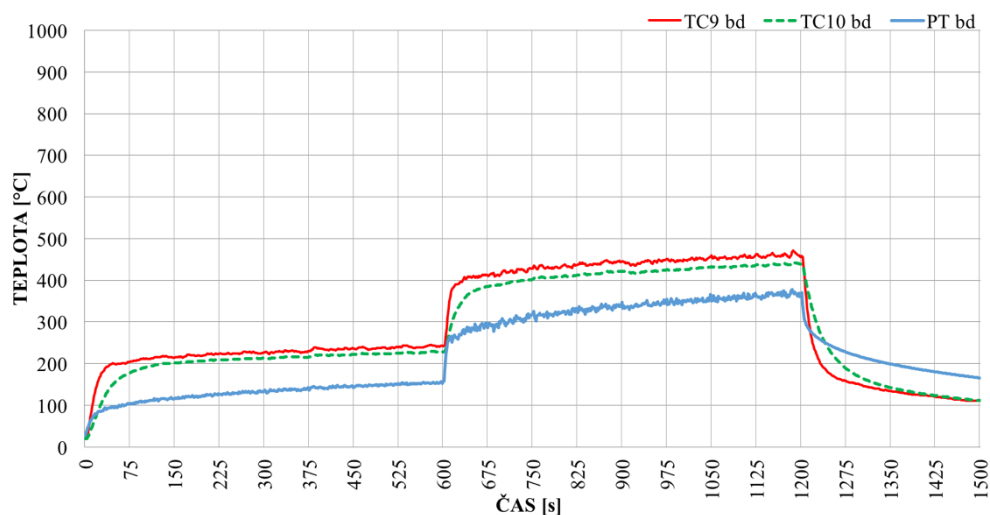


obr. 31: průběh teplot na TC měřících teploty plynu v modelu bez desky: na stromu TC7_{bd} o průměru 1,5 mm a TC8_{bd} o průměru 3 mm, v úrovni otvoru TC11_{bd} o průměru 1,5 mm

Poslední TC, tedy TC9_{bd} o průměru 1,5 mm a TC10_{bd} o průměru 3 mm, byly zdefinovány ve výškách 625 mm a 600 mm nad podlahou, v jejich blízkosti bylo umístěno poslední zařízení pro měření teplot plynu – PT_{bd} o rozměrech 100 x 100 mm ve vzdálenosti 50 mm od stropu. Naměřené hodnoty jsou následující:

- TC9_{bd} max. teplota 472 °C v čase 1187 s 110 °C na konci měření
- TC10_{bd} max. teplota 443 °C v čase 1188 s 111 °C na konci měření
- PT_{bd} max. teplota 378 °C v čase 1185 s 165 °C na konci měření

Jak je vidět na obr. 32, průběhy teplot na obou TC_{bd} dosahují podobných hodnot, zatímco PT_{bd} dosahuje teplot nižších, ale pouze při zapnutém hořáku – důvodem je jeho větší plocha, která se pomaleji ohřívá, ale po vypnutí hořáku si déle udržuje vysokou teplotu. Chování u TC_{bd} ovlivněné průměrem je stejné jako u těch umístěných v nižších úrovních na stromu.

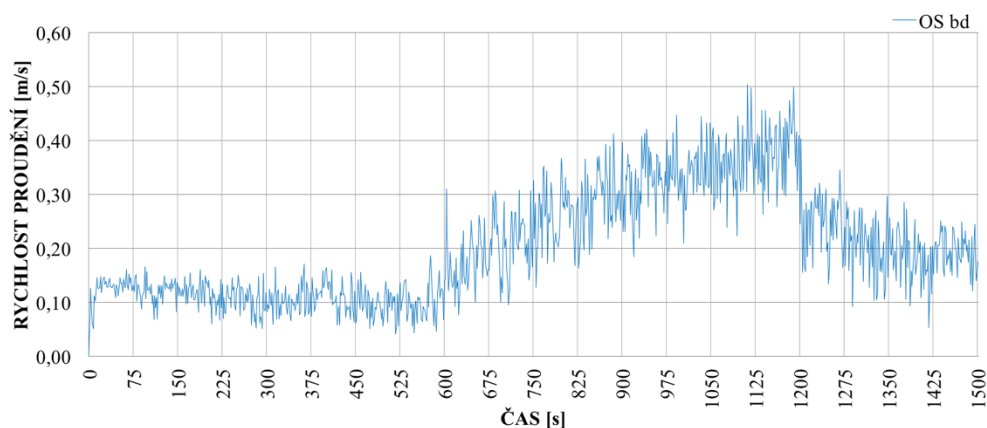


obr. 32: průběh teplot na na PT_{bd} a TC měřících teploty plynu v modelu bez desky: na stromu $TC9_{bd}$ o průměru 1,5 mm a $TC10_{bd}$ o průměru 3 mm

Co se týče posledního měřícího zařízení, tedy obousměrné rychlostní sondy umístěné uprostřed otvoru ve výšce 375 mm (směr osy Z) pro měření rychlosti proudění plynu, byly získány následující hodnoty:

- OS_{bd} max. rychlost proudění 0,5 m/s v čase 1190 s 0,18 m/s na konci měření

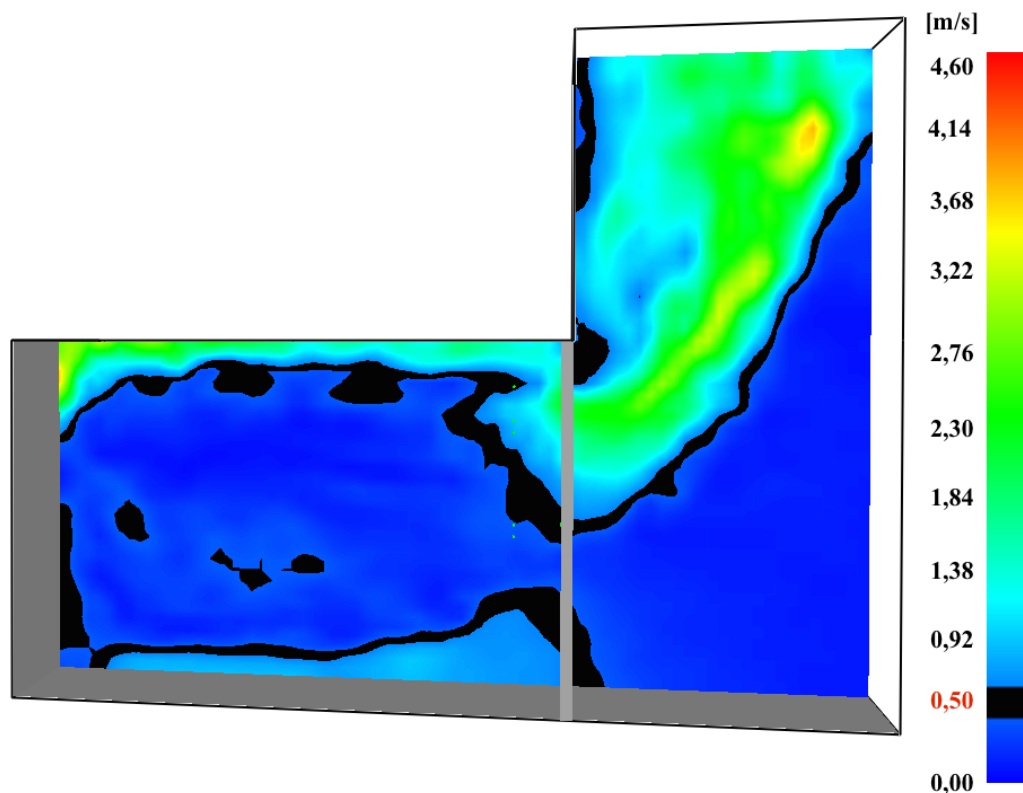
Průběh získaných hodnot je znázorněn na obr. 33. Náhlé zvýšení hodnot je zapříčiněno zapnutím výkonu hořáku na maximum, snížení jeho vypnutím. Celkově je rychlost proudění plynu nízká, protože OS_{bd} je umístěna v polovině výšky otvoru, tedy zhruba i v úrovni neutrální roviny, kde se blíží rozdíly tlaku nule, tím pádem je minimální i rychlost proudění plynu.



obr. 33: rychlost proudění plynu v OS v matematickém modelu bez desky

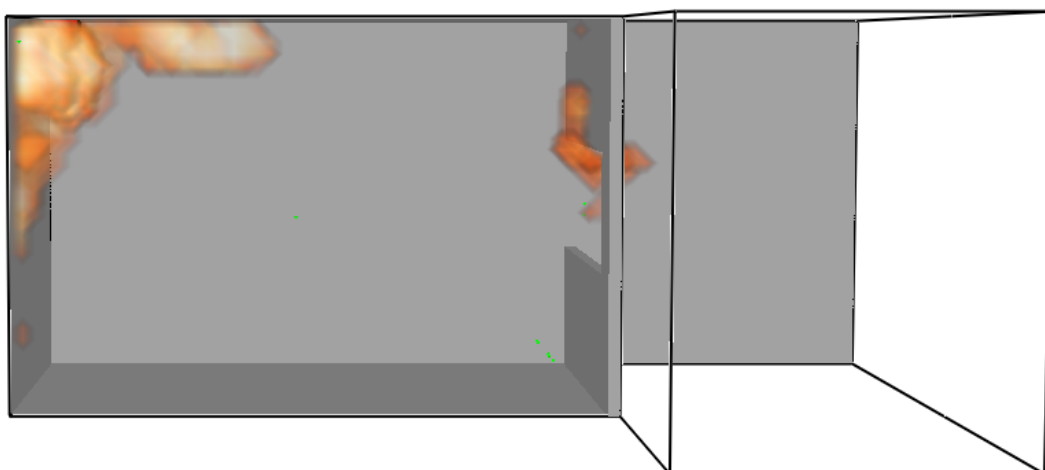
Na obr. 34 je vizualizace průběhu rychlosti proudění uprostřed místnosti i dveřního otvoru, tedy na úrovni osy Y ve vzdálenosti 0,4 m od počátku, a to v čase 1190 s, kdy byla na obousměrné

sondě naměřena maximální rychlost proudění plynu 0,5 m/s. Černá hranice udává linii, kde všude je této rychlosti proudění plynu dosaženo.



obr. 34: rychlost proudění plynu uprostřed modelu v ose $Y = 0,4$ m v čase 1190 s

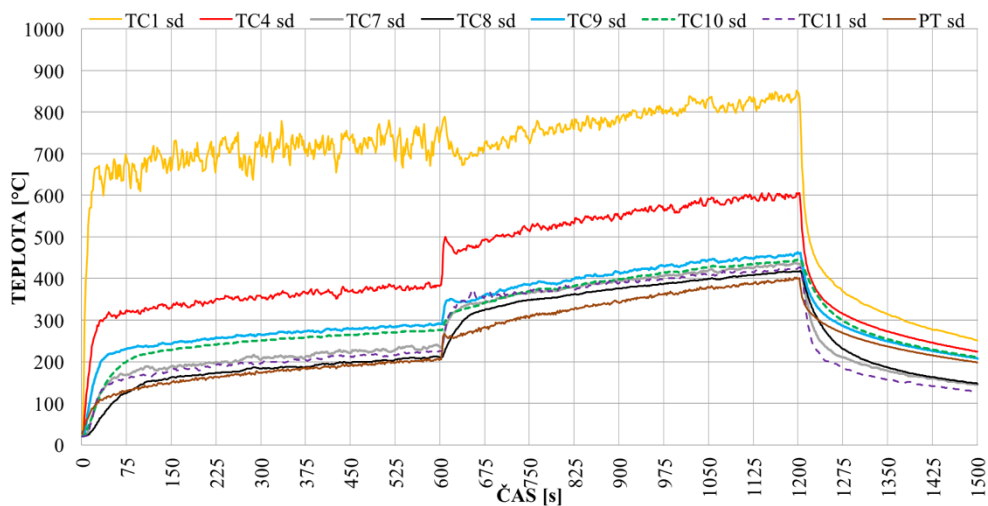
V tomto matematickém modelu došlo k prošlehávání plamenů směrem ven z místnosti do exteriéru, které je viditelné například v čase 941 sekund na obr. 35.



obr. 35: pohled shora – prošlehávání plamene do exteriéru v modelu bez desky v čase 941 s

3.2.2 Matematický model s deskou ve dveřním otvoru

I pro tento model jsou zobrazeny průběhy všech teplot na obr. 36 a následně porovnány pro stejně umístěná měřící zařízení a jejich typy jako u předchozího modelu bez desky.

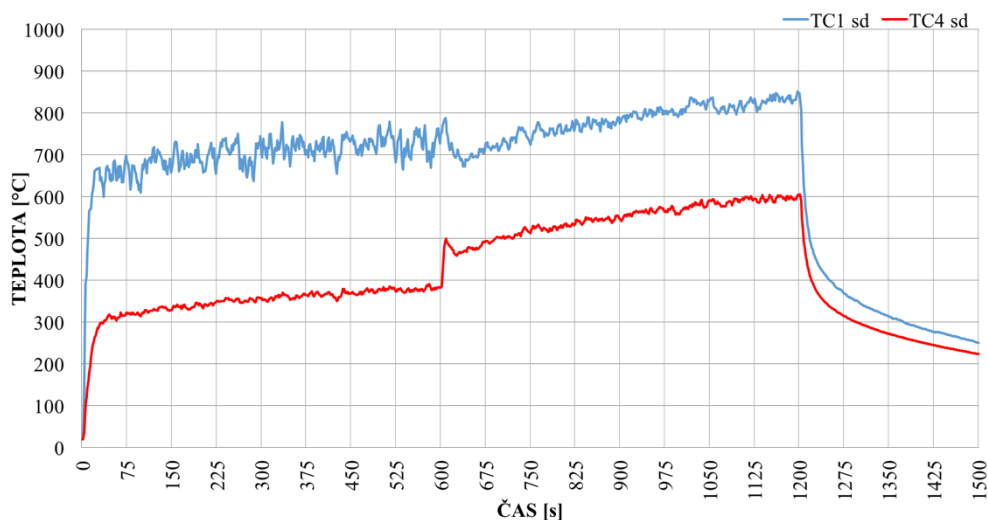


obr. 36: teploty na všech TC i PT v matematickém modelu s deskou

U TC_{sd} měřících povrchové teploty bylo dosaženo následujících hodnot:

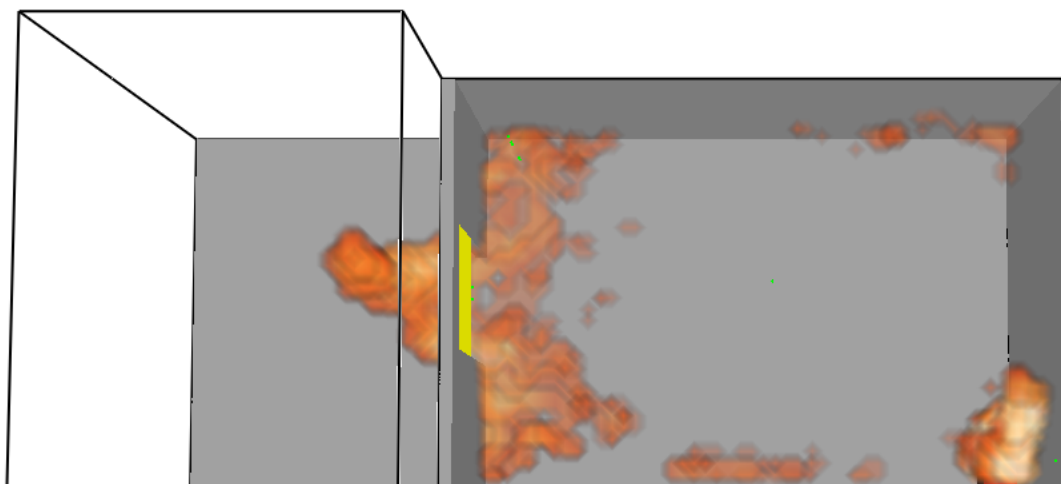
- TC1_{sd} max. teplota 852 °C v čase 1197 s 251 °C na konci měření
- TC4_{sd} max. teplota 605 °C v čase 1202 s 224 °C na konci měření

Na obr. 37 jsou zobrazeny průběhy teplot, kdy po zapnutí hořáku na plný výkon, tedy po začátku 2. fáze v čase 600 s, dojde u TC1_{sd} místo k nárůstu teploty k poklesu, což je způsobeno odklonem plamene od stěn směrem do místnosti z důvodu malé plochy hořáku, která vyzařuje velké množství plamenů přesahující sálavou plochu. TC1_{sd} dosahuje přesto ve všech fázích vyšších teplot než TC4_{sd} umístěný uprostřed stropu.

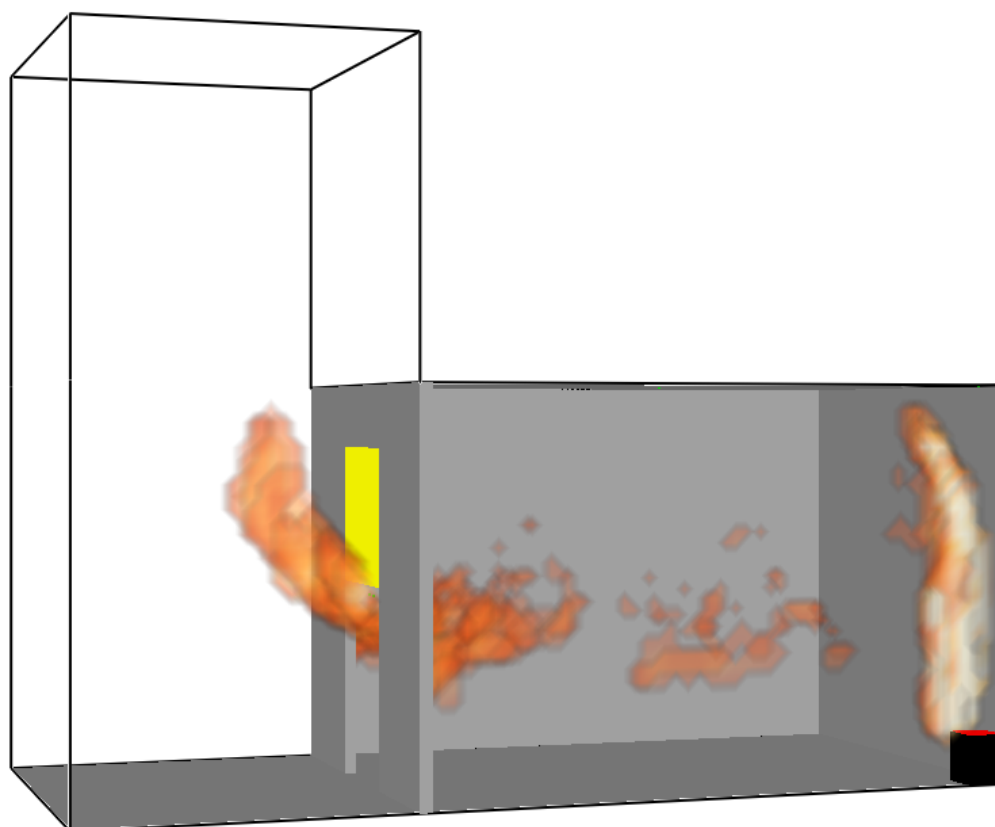


obr. 37: průběh teplot na TC měřících povrchové teploty v modelu s deskou – TC1_{sd} a TC4_{sd}

Odklon plamene od stěn a jeho prošlehnutí ven do exteriéru je zobrazeno pomocí programu Smokeview 6.6.0 na obr. 38 ve dvou pohledech v čase 621 s. V této chvíli dochází k přesunu plamenného hoření do otvoru, kde je kyslík.



(A)



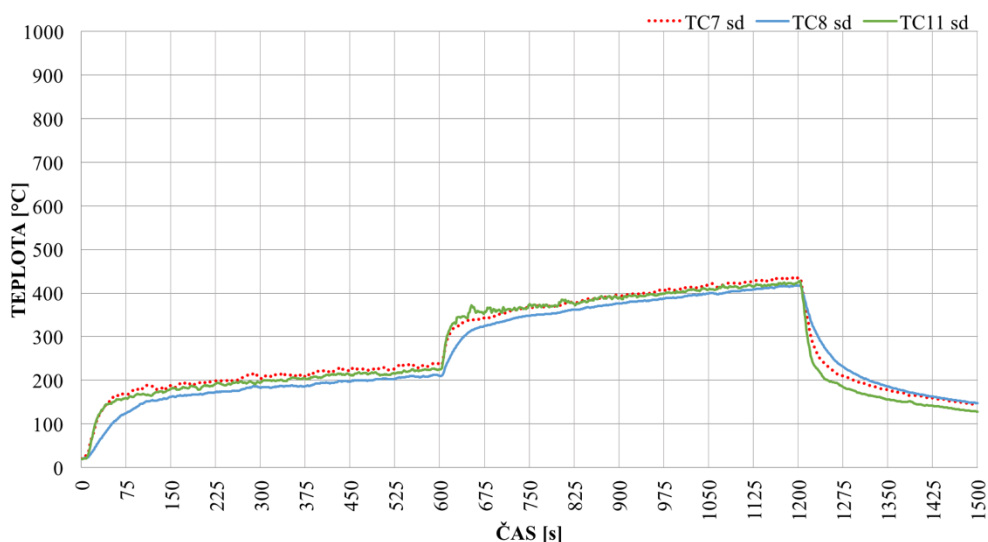
(B)

obr. 38: prošlehávání plamenů do exteriéru a odklon plamene od stěn po zapnutí hořáku na maximální výkon: (A) pohled shora, (B) pohled z boku

Přímým plamenem byl ovlivněn TC11_{sd} umístěn ve dveřním otvoru nedaleko spodní hrany desky z minerální izolace. Hodnoty, kterých bylo dosaženo na něm a na TC umístěných na stromu, tedy TC7_{sd} o průměru 1,5 mm ve výšce 400 mm a TC8_{sd} o průměru 3 mm ve výšce 375 mm nad podlahou, jsou následující:

- TC7_{sd} max. teplota 437 °C v čase 1194 s 144 °C na konci měření
- TC8_{sd} max. teplota 417 °C v čase 1203 s 147 °C na konci měření
- TC11_{sd} max. teplota 426 °C v čase 1202 s 128 °C na konci měření

Kvůli přímému ovlivnění plamenem má TC11_{sd} po začátku 2. fáze nejrychlejší nárůst teploty, zhruba v polovině této fáze (stejně jako v první) dosahuje nejvyšších teplot TC7_{sd} o menším průměru než TC8_{sd}, který má ale opět ve fázi chladnutí teploty nejvyšší díky svému většímu průměru a tím pádem i ploše. Velmi podobných teplot dosahovaly v 1. i 2. fázi termoelektrické články s menším průměrem, kterým se začal přibližovat TC s průměrem větším až ke konci druhé fáze před vypnutím hořáku. Průběhy jsou znázorněny na obr. 39.



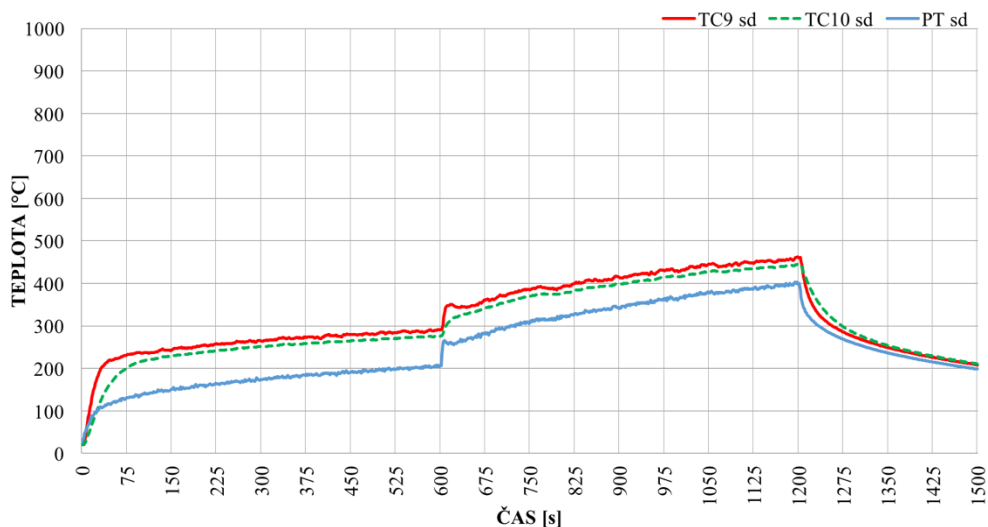
obr. 39: průběh teplot na TC měřících teploty plynu v modelu s deskou: na stromu TC7_{sd} o průměru 1,5 mm a TC8_{sd} o průměru 3 mm, v úrovni otvoru TC11_{sd} o průměru 1,5 mm

Na posledních zařízeních měřících teploty plynu, tedy TC9_{sd} o průměru 1,5 mm (625 mm nad podlahou), TC10_{sd} o průměru 3 mm (600 mm nad podlahou) a PT_{sd} o rozměrech 100 x 100 mm ve vzdálenosti 50 mm od stropu, byly dosaženy následující teploty:

- TC9_{sd} max. teplota 462 °C v čase 1199 s 208 °C na konci měření
- TC10_{sd} max. teplota 445 °C v čase 1203 s 210 °C na konci měření
- PT_{sd} max. teplota 403 °C v čase 1194 s 198 °C na konci měření

Jak je vidět na obr. 40, průběhy teplot po zapnutí hořáku na plný výkon, tedy ve 2. fázi, výrazněji rostou u TC9_{sd} a PT_{sd}, zde je opět vidět skok teplot při prošlehnutí plamenů do exteriéru. Ve fázi chladnutí si ale v tomto případě už nadržují nejvyšší teploty PT_{sd}, což je také způsobeno tím,

že po celou dobu byly více ovlivňovány přímým plamenem TC9_{sd} a TC10_{sd} umístěné níže. I proto má PT_{sd} průběh teplot nejnižší po celou dobu měření.

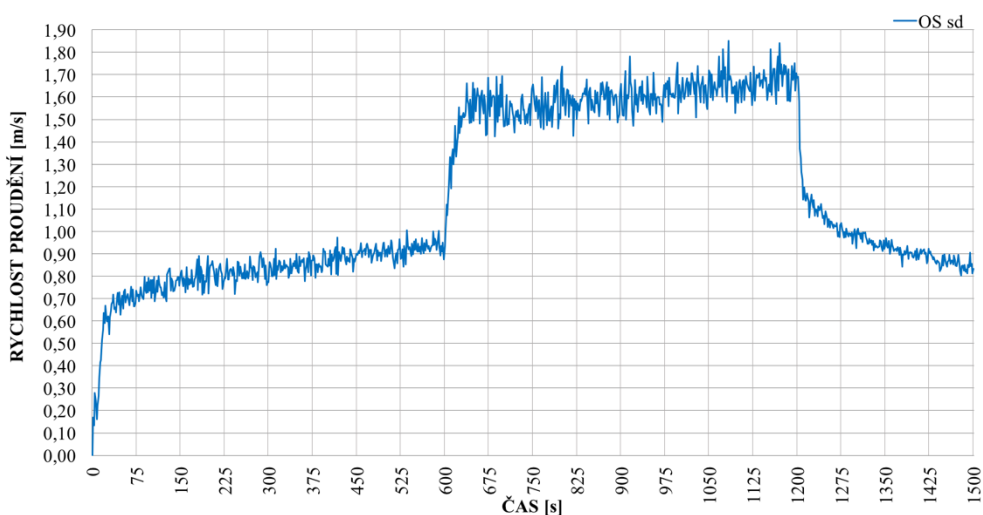


obr. 40: průběh teplot na na PT_{sd} a TC měřících teploty plynu v modelu s deskou: na stromu TC9_{sd} o průměru 1,5 mm a TC10_{sd} o průměru 3 mm

V tomto matematickém modelu byly dosaženy výrazně větší rychlosti proudění plynu na obousměrné sondě v otvoru než v matematickém modelu bez desky, hodnoty jsou zobrazeny na obr. 41 a jsou následující:

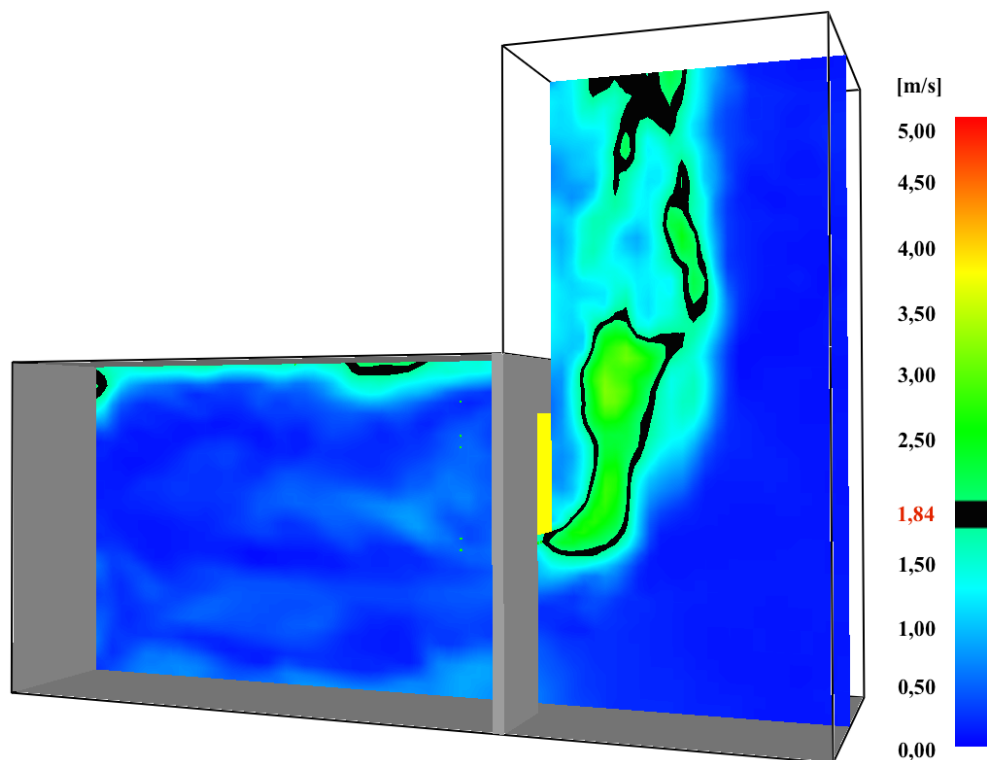
- OS_{sd} max. rychlost proudění 1,85 m/s v čase 1083 s 0,83 m/s na konci měření

Vyšší hodnoty byly důsledkem především prošlehávání plamenů ven z místnosti. Znatelný nárůst je po zapnutí hořáku na maximální výkon.



obr. 41: rychlost proudění plynu v OS v matematickém modelu s deskou

Dále je na obr. 42 vizualizace průběhu rychlosti proudění uprostřed dveřního otvoru, tedy na úrovni osy Y ve vzdálenosti 0,4 m od počátku, a to v čase 1083 s, kdy byla na obousměrné sondě naměřena maximální rychlost proudění 1,85 m/s. Černá hranice udává linii, kde všude je dosaženo rychlosti proudění plynu 1,84 m/s (stupnice ukazuje pouze sudá čísla, proto není hranice v 1,85 m/s).



obr. 42: rychlost proudění plynu uprostřed modelu v ose Y = 0,4 m v čase 1083 s

3.3 Požární experiment

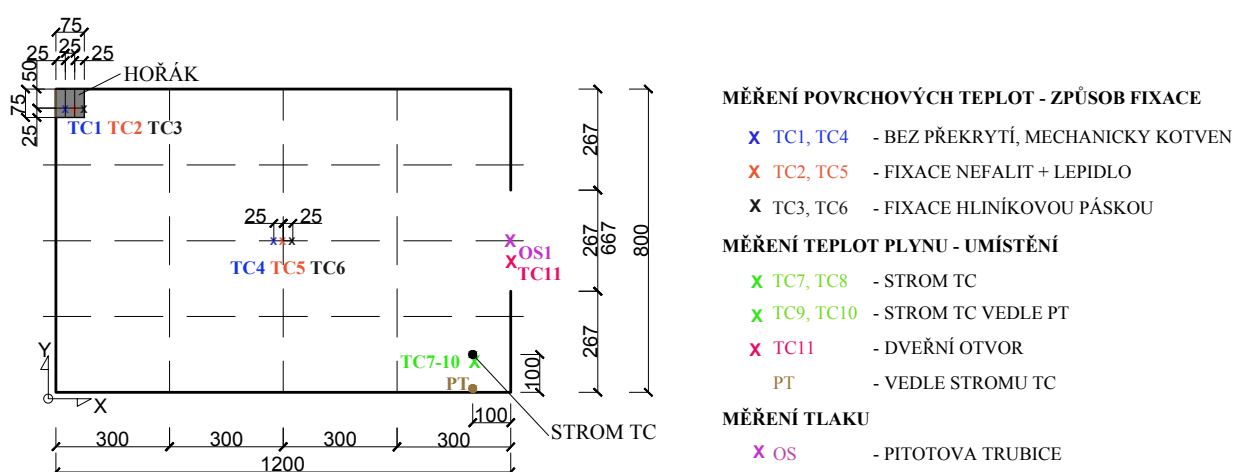
Požární experiment proběhl 29. listopadu 2018 v požární laboratoři UCEEB ČVUT v Praze, o které je více informací v kapitole 2.1. Byla vytvořena místnost z desek Fermacell Powerpanel H₂O tl. 12,5 mm. Jelikož v obvodových stěnách byly kromě dveřního otvoru ještě 4 otvory pro účely jiného experimentu, byly při tomto zakryty minerální vatou. Do rohu místnosti se umístil propanový hořák o půdorysných rozměrech 75 x 75 mm a výšce 100 mm (stejně jako v matematických modelech) a požadovaná měřicí zařízení. Provedení zkušební místnosti včetně měřicích zařízení je vidět na obr. 43, kde je pohled na přední stěnu s otvorem z části zakrytou deskou z minerální izolace, na boku jsou vidět 2 tvory zakryté po celé ploše taktéž minerální izolací. Před otvorem jsou umístěny 2 obousměrné rychlostní sondy na stojanu, které slouží k měření tlaku v pascálech, následně je nutný přepočítání k získání rychlosti proudění. Pro potřeby tohoto měření postačovala sonda pouze jedna (ve vyšší výškové úrovni), druhá byla přidána pro získání více informací. Vedle každé sondy je připevněn TC o průměru 1,5 mm měřící teplotu proudícího plynu. Deskový snímač teploty byl umístěn vedle stromu

v požadované výškové úrovni, jelikož jeho konstrukce neumožňovala ho připevnit přímo na strom s dalšími čtyřmi TC. Strom byl tvořen drátkem připevněným k podlaze a ke stropu.



obr. 43: fotografie zkušební místnosti

Oproti matematickým modelům jsou v požárním experimentu navíc 4 termoelektrické články o průměru 3 mm měřící povrchové teploty pod stropem. Každé dva jsou ke stropu jinak připevněny. Celkem jsou tedy nad hořákem 3 TC a uprostřed stropu také, způsoby přichycení jsou následující – “volný TC“ (mechanicky ukotven, ale bez zakrytí měřícího spoje), TC překrytý deskou Nefalit + lepidlem Promat® K 84 a další překrytý hliníkovou samolepicí páskou. Zbývá měřící zařízení jsou ve shodě s matematickými modely. Plánek rozložení měřicích zařízení je zobrazen na obr. 44. Technický list pro desku Nefalit je k nahlédnutí v Příloze 3.



obr. 44: půdorys zkušební místnosti pro požární experiment včetně měřicích zařízení pod stropem, na stromu, u stěny a v otvoru

Způsob připevnění TC instalovaných navíc je znázorněn na obr. 45, konkrétně se jedná o všechny tři termoelektrické články umístěné nad hořákem.



obr. 45: TC pod stropem pro měření povrchové teploty, vlevo TC pod deskou Nefalit s lepidlem, uprostřed připevněn TC hliníkovou samolepicí páskou, vpravo TC bez zakrytí měřicího bodu mechanicky kotven podložkou a vrutem

Po zaschnutí lepidla, kterým se připevnila deska Nefalit u dvou TC o průměru 3 mm, se deska stropu nasadila na místnost a upevnila. Vnitřek místnosti se šesti TC umístěnými pod stropem a s propanovým hořákem umístěným v rohu je vidět na obr. 46.



obr. 46: vnitřek zkušební místnosti s TC pod stropem a propanovým hořákem v rohu

Koncové prvky všech měřicích zařízení byly označeny podle toho, o jaké měřicí zařízení včetně pořadového čísla se jednalo, dále byly zapojeny do dataloggeru, který je zobrazen na obr. 47, pomocí kterého byly zaznamenávány průběžně výsledky z požárního experimentu a následně přenášeny do počítače, kde byly v celém průběhu požárního experimentu sledovány.



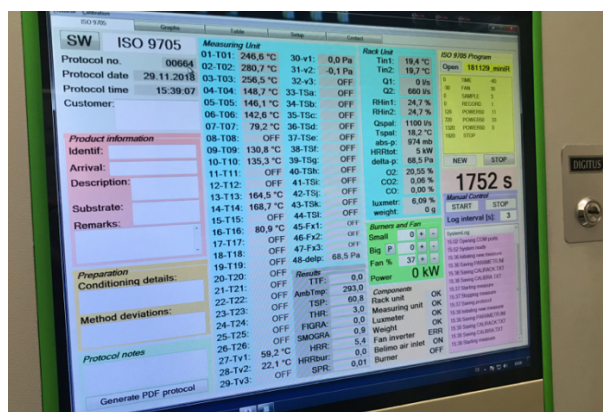
obr. 47: datalogger včetně napojení všech měřicích zařízení

Výkon hořáku byl na počítači nastaven stejně jako pro matematické modely:

- 0 – 10 min výkon 100 kW /9 = 11,1 kW
- 11 – 20 min výkon 300 kW /9 = 33,3 kW
- 21 – 25 min vypnutí hořáku, chladnutí

3.3.1 Průběh požárního experimentu

Požární experiment začal v čase 15:34:32, kdy byl spuštěn propanový hořák. Ve skutečnosti byl START na počítači pro zobrazování zapnut o 120 s dříve, jelikož po tento čas byly snímány podmínky okolí v sestavené místnosti. Čas i měřené hodnoty byly po celou dobu experimentu sledovány na obrazovce počítače, která je na obr. 48.



obr. 48: obrazovka počítače pro sledování hodnot v průběhu požárního experimentu

V průběhu celého požárního experimentu se pomocí anemometru (obr. 49), což je přístroj pro měření rychlosti proudění a teploty, po 2 minutách měřila rychlost proudění u spodní rychlostní sondy po dobu 1 minuty, a to z toho důvodu, že obousměrné sondy v požární laboratoři, jak již bylo zmíněno, měří hodnoty tlaku, proto měl anemometr sloužit k následnému ověření správných výpočtů. Anemometr nebyl přiložen k rychlostní sondě umístěné výše, jelikož tento typ je použitelný pouze při teplotě do 50 °C, kterých, jak byl správný předpoklad, v nižší úrovni dosaženo nebylo.



obr. 49: anemometr v průběhu měření rychlosti proudění a teploty

V čase 15:39, tedy po 268 sekundách (cca necelých 4,5 minutách) po začátku experimentu, vypadala místnost s hořákem následovně – viz obr. 50. Na obrázku je vidět i měřicí tyč anemometru (u stojanu na zemi), která se přikládala k rychlostní sondě ve spodní úrovni. Výkon hořáku byl v tomto čase nižší, ne plný, tedy 11,1 kW.



obr. 50: místnost po cca 4,5 minutách po začátku experimentu při výkonu hořáku 11,1 kW, na zemi u stojanu je měřicí tyč pro anemometr

V čase 15:42:55, tedy po 503 sekundách (cca 8,38 minutách), se začala v místnosti tvořit kouřová vrstva, která je na obr. 51, kde jsou vidět i plameny dosahující až ke stropu přímo na připevněné TC.



obr. 51: tvořící se kouřová vrstva v čase 503 s a plameny dosahující ke stropu

Hustá kouřová vrstva, přes kterou už téměř nebyly vidět plameny od hořáku až ke stropu a byla zřetelně viditelná i bez pohledu přímo do místnosti, je zaznamenána na obr. 52 v čase cca 14,7 minut, kdy hořák dosahoval svého plného výkonu už cca 4,7 minut.



(A)

(B)

obr. 52: kouřová vrstva v čase: (A) 880 s (14,67 min), (B) 889 s (14,82 min)

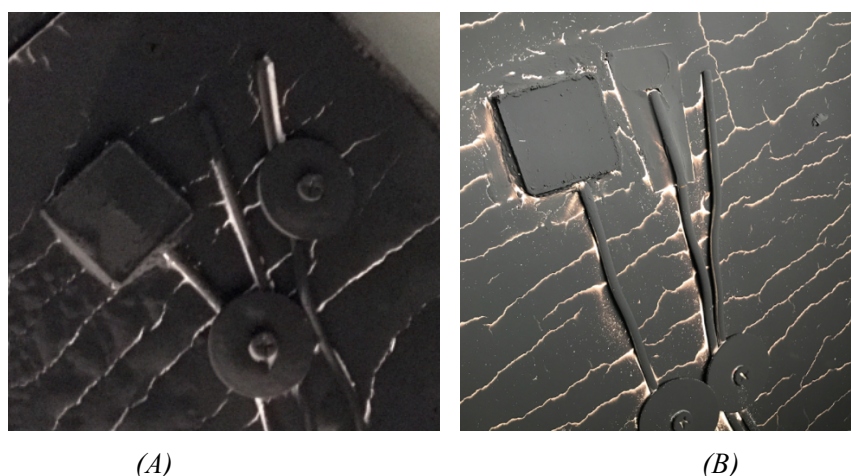
Po skončení požárního experimentu se zkušební místnost nechala chvíli vychladnout, poté rozebírat a vyndala se použitá měřicí zařízení.

Strop a stěny místnosti po proběhlém požárním experimentu jsou znázorněny na obr. 53, kde je jasně vidět i nejnižší úroveň kouřové vrstvy, ve které se usazovaly na stěnách a stropě saze.



obr. 53: strop a stěny zkušební místnosti po skončení požárního experimentu

V průběhu experimentu byly přímým plamenům vystaveny TC na stropě nad hořákem, kdy z prostředního TC, který byl připevněn pomocí hliníkové pásky ke stropu, tato páska odpadla. Připevnění pomocí destičky Nefalitu + lepidla Promat® K 84 u obou TC a pomocí hliníkové samolepicí pásky u druhého TC uprostřed stropu po dobu celého požárního experimentu i po skončení vydržela. TC umístěné na stropě jsou po vychladnutí zkušební místnosti znázorněna na obr. 54. Na TC bez překrytí, pouze mechanicky kotveném nad hořákem, došlo k odklonění konce od povrchu.



(A)

(B)

obr. 54: stav TC včetně jejich připevnění po požárním experimentu: (A) TC nad hořákem, (B) TC uprostřed stropu

3.3.2 Výsledky požárního experimentu

V této kapitole jsou shrnuty a vzájemně porovnány naměřené hodnoty z požárního experimentu. Porovnávány jsou jen teploty povrchu a plynu, jelikož vzhledem k tomu, že obousměrné sondy pro měření tlaku a následnému výpočtu rychlosti proudění nemohly být umístěny přímo do otvoru zkušební místnosti, nebylo to konstrukčně proveditelné, sondy měřily hodnoty před zkušební místností, kde byl tlak téměř nulový.

Maximální naměřené teploty povrchu i plynu, čas jejich dosažení a teploty na konci požárního experimentu jsou shrnuty v tab. 9. Dva TC dosáhly ve stejný čas svých nejvyšších teplot – TC5_{ex} (snímač povrchové teploty) a PT_{ex} (snímač teploty plynu) v čase 1213 s, v čase 1204 s své nejvyšší teploty dosáhlo dokonce 7 TC, tedy těsně po zvýšení výkonu hořáku na maximální výkon – TC4_{ex} a TC6_{ex} až TC11_{ex}. Z deskového snímače teploty byly získávány při měření dvojí hodnoty, výsledné naměřené teploty jsou spočítány průměrem z nich. Index “ex“ značí, že jde o zařízení umístěna v požárním experimentu.

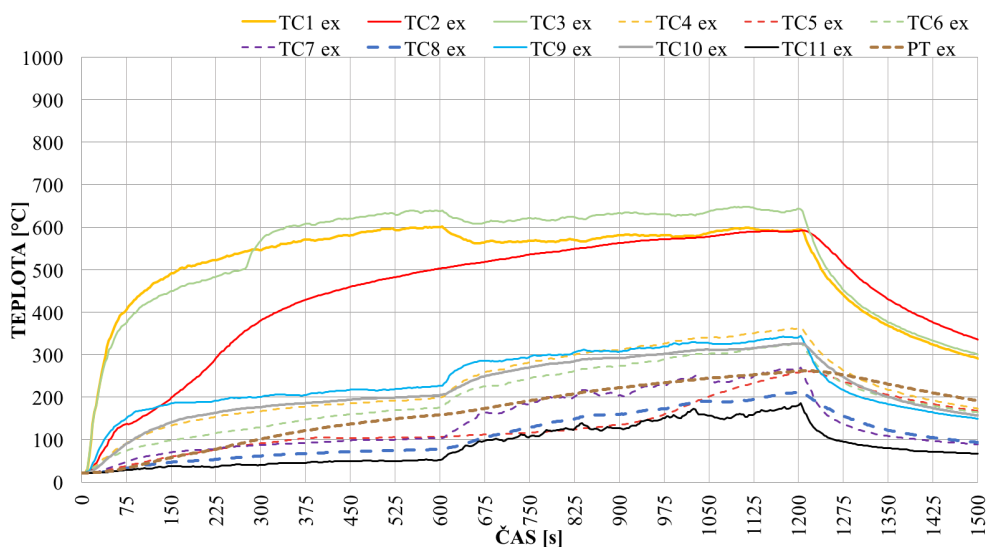
tab. 9: shrnutí nejdůležitějších dosažených teplot při požárním experimentu

Zařízení	Měření	Průměr / rozměr [mm]	Maximální teplota [°C]	Čas, kdy je dosaženo max. teploty [s]	Teplota na konci měření [°C]
TC1 _{ex}	teploty povrchové	3 mm	602	604	291
TC2 _{ex}			592	1207	335
TC3 _{ex}			648	1114	300
TC4 _{ex}			363	1204	173
TC5 _{ex}			261	1213	167
TC6 _{ex}			327	1204	164
TC7 _{ex}	1,5 mm	269	89		
TC8 _{ex}	3 mm	211	93		
TC9 _{ex}	1,5 mm	343	149		
TC10 _{ex}	3 mm	326	156		
TC11 _{ex}	1,5 mm	186	66		
PT _{ex}		100 x 100	262	1213	192

Pro připomenutí byla fixace TC měřících povrchové teploty následující:

- TC1_{ex}, TC4_{ex} mechanicky kotven, bez překrytí měřícího bodu
- TC2_{ex}, TC5_{ex} fixace Nefalit + lepidlo Promat® K 84
- TC3_{ex}, TC6_{ex} fixace hliníkovou samolepicí páskou

Všechny průběhy teplot v době celého požárního experimentu jsou znázorněny na obr. 55 na následující straně a následně porovnávány zvlášť podle toho, kde jsou umístěny nebo jakého jsou průměru.

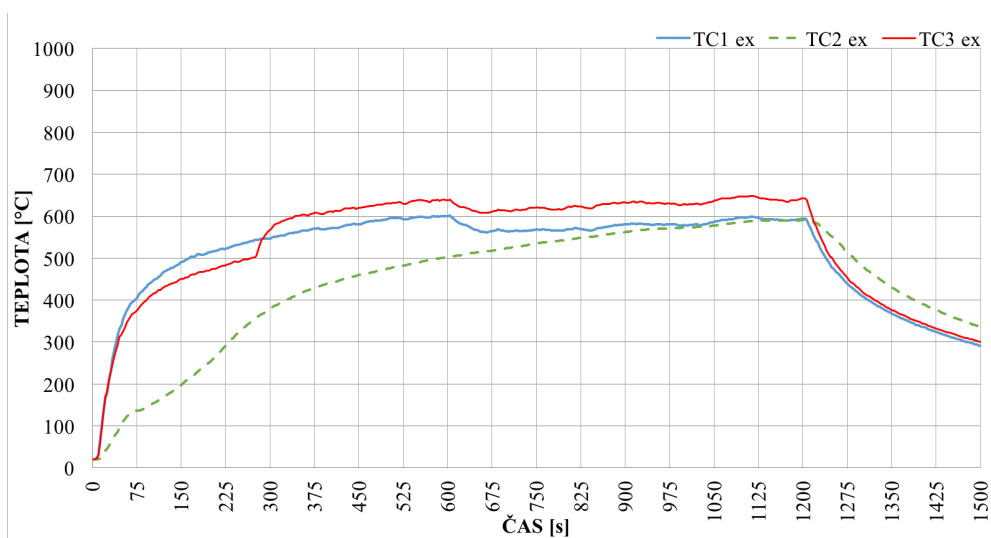


obr. 55: teploty na všech TC v požárním experimentu

Jako první jsou porovnány TC_{ex} o průměru 3 mm umístěny na stropě přímo nad hořákem, na nichž bylo dosaženo následujících teplot zobrazených také na obr. 56:

- $TC1_{ex}$ max. teplota 602 °C v čase 604 s 291 °C na konci měření
- $TC2_{ex}$ max. teplota 592 °C v čase 1207 s 335 °C na konci měření
- $TC3_{ex}$ max. teplota 648 °C v čase 1114 s 300 °C na konci měření

Nejvyšších teplot dosahuje $TC3_{ex}$ připevněný pomocí desky Nefalit a lepidla (z počátku $TC1_{ex}$ bez překrytí), což je nejspíše (jako u matematických modelů) způsobeno odkláněním plamene od stěn, jelikož tento TC byl krajní a od hořáku nejvzdálenější. Odklon plamene způsobil i to, že po zvýšení výkonu hořáku na maximum po 600. sekundě nedocházelo k nárůstu teplot, ale k poklesu. Nejnižších teplot dosahuje hliníkovou páskou přelepený $TC2_{ex}$, od kterého se v průběhu experimentu páska odlepila, ale má naopak ve fázi chladnutí teploty nejvyšší.

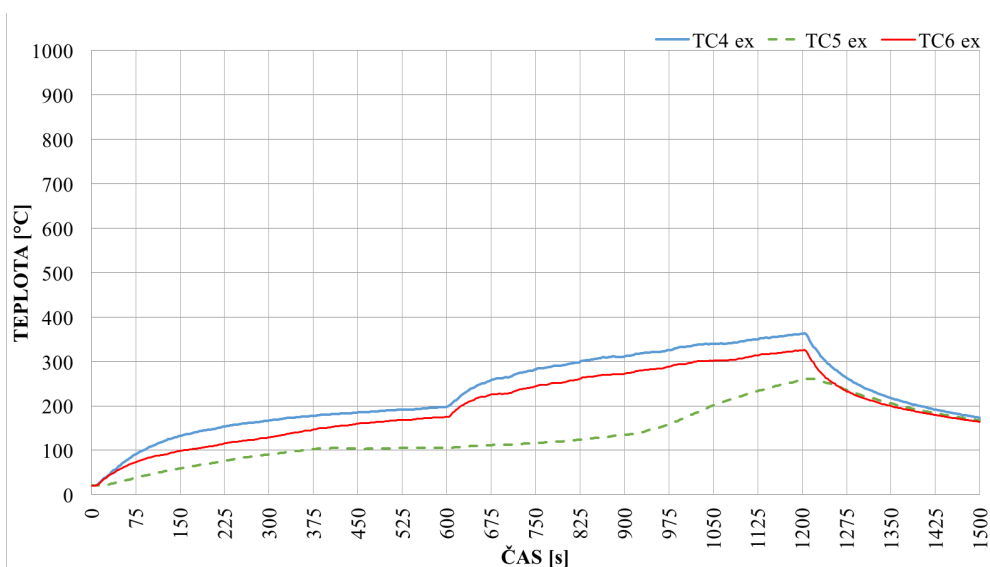


obr. 56: průběh teplot na TC o průměru 3 mm přímo nad hořákem měřících povrchové teploty v požárním experimentu – $TC1_{ex}$ (bez překrytí), $TC2_{ex}$ (Nefalit + lepidlo), $TC3_{ex}$ (hliníková páska)

Jako další byly pod stropem připevněny stejným způsobem tyto termoelektrické články s následujícím průběhem teplot:

- TC4_{ex} max. teplota 363 °C v čase 1204 s 173 °C na konci měření
- TC5_{ex} max. teplota 261 °C v čase 1213 s 167 °C na konci měření
- TC6_{ex} max. teplota 327 °C v čase 1204 s 164 °C na konci měření

Průběhy (obr. 57) na těchto TC_{ex} vzdálenějších od hořáku (uprostřed stropu) ukazují, že TC4_{ex} a TC6_{ex} reagují na zapnutí výkonu hořáku na maximum nárůstem teploty, ale TC5_{ex} překrytý hliníkovou páskou má při zapnutém hořáku opět nejnižší teploty, nejvyšších dosahuje TC5_{ex}, který je pouze mechanicky kotven a měřící bod nemá zakrytý. Na konci měření, po fázi chladnutí, mají všechny teplotu podobnou.



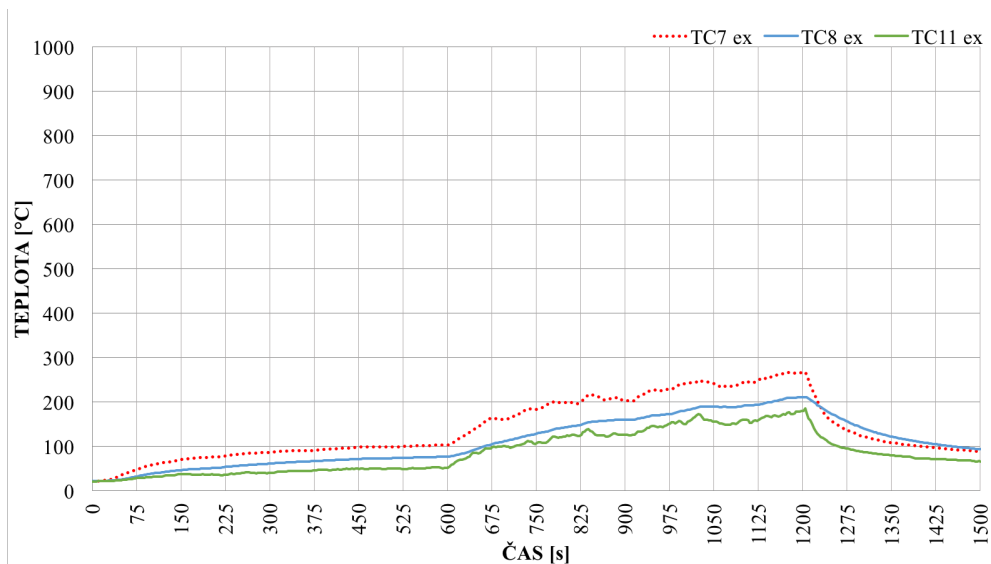
obr. 57: průběh teplot na TC o průměru 3 mm uprostřed stropu měřících povrchové teploty v požárním experimentu – TC4_{ex} (bez překrytí), TC5_{ex} (Nefalit + lepidlo), TC6_{ex} (hliníková páska)

V dalším porovnání jsou TC_{ex} v nižší úrovni na stromu a TC11_{ex} o průměru 1,5 mm umístěný v otvoru. Hodnoty, kterých na TC11_{ex}, TC7_{ex} o průměru 1,5 mm ve výšce 400 mm a TC8_{ex} o průměru 3 mm ve výšce 375 mm nad podlahou, bylo dosaženo, jsou následující:

- TC7_{ex} max. teplota 269 °C v čase 1204 s 89 °C na konci měření
- TC8_{ex} max. teplota 211 °C v čase 1204 s 93 °C na konci měření
- TC11_{ex} max. teplota 186 °C v čase 1204 s 66 °C na konci měření

Dle obr. 58 má nejplynulejší průběh TC8_{ex}, který díky svému většímu průměru (3 mm) oproti ostatním dvěma TC o průměru menším (1,5 mm) není tolik citlivý na proudění vzduchu do a z místnosti, které je u otvoru znatelnější než v ostatních částech zkušební místnosti. Nejvyšších hodnot při zapnutém hořáku dosahuje TC7_{ex} na stromu, a to díky svému menšímu průměru, který se lépe ohřívá (oproti TC8_{ex}) a není ochlazován proudícím vzduchem

(oproti $TC_{11_{ex}}$). Nejnižších teplot dosahuje $TC_{11_{ex}}$ v otvoru, jelikož není přímo v otvoru, ale z konstrukčních důvodů dále od něj a neovlivňuje ho ani prošlehávání plamenů do exteriéru, ke kterému nedošlo. Teplo z hořáku na něj má nejmenší vliv, protože je od něj nejvzdálenější a navíc i v nízké úrovni blíže k podlaze.

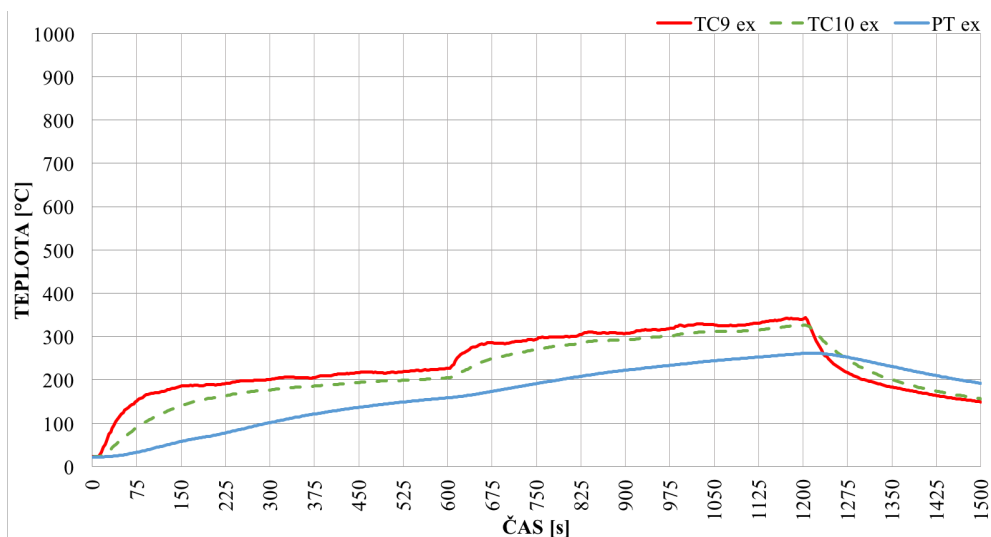


obr. 58: průběh teplot na TC měřících teploty plynu v požárním experimentu: na stromu $TC_{7_{ex}}$ o průměru 1,5 mm a $TC_{8_{ex}}$ o průměru 3 mm, v úrovni otvoru $TC_{11_{ex}}$ o průměru 1,5 mm

Zbývajícími měřicími zařízeními k porovnání dosažených teplot plynu jsou $TC_{9_{ex}}$ o průměru 1,5 mm (ve výšce 625 mm nad podlahou), $TC_{10_{ex}}$ o průměru 3 mm (ve výšce 600 mm nad podlahou) a PT_{ex} o rozměrech 100 x 100 mm zhruba ve stejné výškové úrovni, ale blíže u stěny. Byly naměřeny následující teploty:

- $TC_{9_{ex}}$ max. teplota 343 °C v čase 1204 s 149 °C na konci měření
- $TC_{10_{ex}}$ max. teplota 326 °C v čase 1203 s 156 °C na konci měření
- PT_{ex} max. teplota 262 °C v čase 1194 s 192 °C na konci měření

Oba TC_{ex} dosahují podobných teplot maximálních i na konci měření, $TC_{9_{ex}}$ s menším průměrem opět reaguje na změnu výkonu hořáku i jeho vypnutí citlivěji, ale oproti němu si i zde udržuje $TC_{10_{ex}}$ s větším průměrem ve fázi chladnutí vyšší teplotu. V této fázi má však teplotu nejvyšší PT_{ex} díky své větší ploše, ale při zapnutém hořáku teplota rovnoměrně narůstala bez ohledu na zvýšení výkonu, a také byla nižší oproti $TC_{10_{ex}}$ umístěným v téže úrovni. Průběhy teplot jsou zobrazeny na obr. 59 na následující straně.



obr. 59: průběh teplot na na PT_{ex} a TC měřících teploty plynu při požárním experimentu: na stromu $TC9_{ex}$ o průměru 1,5 mm a $TC10_{ex}$ o průměru 3 mm

Oproti předchozím kapitolám s výsledky z matematických modelů s deskou a bez desky ve dveřním otvoru v této kapitole popisující výsledky požárního experimentu chybí průběh rychlosti proudění plynu, jelikož naměřené hodnoty tlaku pro její výpočet nebyly použitelné.

3.4 Porovnání požárního experimentu a matematického modelu s deskou ve dveřním otvoru

V této kapitole jsou porovnávány výsledky proběhlých výpočtů matematického modelu s deskou ve dveřním otvoru a požárního experimentu. Pro odlišení měřících zařízení od sebe navzájem podle toho, zda byla použita v modelu nebo experimentu, jsou opět používány indexy “sd“ pro matematický model s deskou a “ex“ pro požární experiment. Porovnávány budou pouze teploty povrchové a teploty plynu, protože měření rychlosti proudění plynu při požárním experimentu nebylo úspěšné, jak je vysvětleno již v předchozí kapitole. Dále nejsou porovnávány způsoby fixace TC, protože odlišné způsoby byly použity pouze v požárním experimentu.

Výsledky ze všech měřících zařízení pro měření teplot použitých v experimentu i v matematickém modelu s deskou jsou vypsány v tab. 10, kde jsou vidět maximální naměřené hodnoty a v jakém nastaly čase a dále teploty na konci měření, tedy po fázi chladnutí v čase 1 500 s.

tab. 10: zařízení měřící teploty použita v požárním experimentu a matematickém modelu s deskou

Zařízení	Měření	Průměr / rozměr [mm]	Maximální teplota [°C]	Čas, kdy je dosaženo max. teploty [s]	Teplota na konci měření [°C]
<i>TC1_{sd}</i>	teploty povrchové	3	852	1197	251
<i>TC1_{ex}</i>			602	604	291
<i>TC4_{sd}</i>			605	1202	224
<i>TC4_{ex}</i>			363	1204	173
<i>TC7_{sd}</i>	teploty plynu	1,5	437	1194	144
<i>TC7_{ex}</i>			269	1204	89
<i>TC8_{sd}</i>		3	417	1203	147
<i>TC8_{ex}</i>			211	1204	93
<i>TC9_{sd}</i>		1,5	462	1199	208
<i>TC9_{ex}</i>			343	1204	149
<i>TC10_{sd}</i>		3	445	1203	210
<i>TC10_{ex}</i>			326	1204	156
<i>TC11_{sd}</i>		1,5	426	1202	128
<i>TC11_{ex}</i>			186	1204	66
<i>PT_{sd}</i>		100 x 100	403	1194	198
<i>PT_{ex}</i>			262	1213	192

3.4.1 Povrchové teploty

Povrchové teploty byly měřeny pouze TC o průměru 3 mm na stropě ve dvou místech – přímo nad hořákem (TC1) a uprostřed stropu (TC4).

Prvním porovnáním na obr. 60 je porovnání povrchových teplot měřených pomocí TC1 umístěných přímo nad hořákem bez překrytí měřicího bodu, přichycení pouze mechanickým kotvením. Bylo dosaženo následujících hodnot:

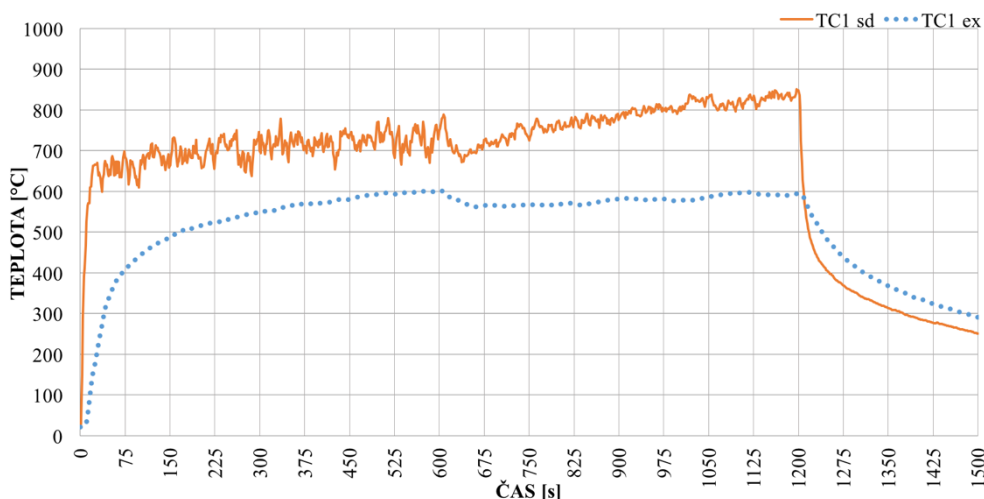
- TC1_{sd} max. teplota 852 °C v čase 1197 s 251 °C na konci měření
- TC1_{ex} max. teplota 602 °C v čase 604 s 291 °C na konci měření

Na první pohled jsou rozdílné křivky znázorňující průběhy teplot, ty z požárního experimentu nemají tolik výchylek, tolik neoscilují, protože z matematického modelu bylo získáno větší množství dat (jednou tolik), zatímco z požárního experimentu se ukládala data po 3 sekundách, proto je průběh více rovnoměrný.

Ve fázi třetinového výkonu hořáku (po prvních 600 s) na obou TC1 dochází k nárůstu teploty, u TC1_{sd} k rychlejšímu, po celou dobu dosahuje výrazně vyšších teplot, naopak je tomu ve fázi chladnutí, kdy vyšší teplotu má TC1_{ex}. Důvodem těchto vyšších teplot je to, že v matematickém modelu jsou ideální podmínky neovlivněné okolím.

Po zvýšení výkonu hořáku na maximální výkon, tedy po 600. sekundě, dosáhl TC1_{ex} své maximální teploty, poté začala teplota klesat, což je z toho důvodu, že plamen se z malé plochy hořáku začal odklánět od rohu směrem do místnosti (stejný jev i u TC1_{sd}), poté teplota opět roste díky horké vrstvě plynu pod stropem.

Po proběhlé fázi chladnutí má vyšší teplotu TC1_{ex}.

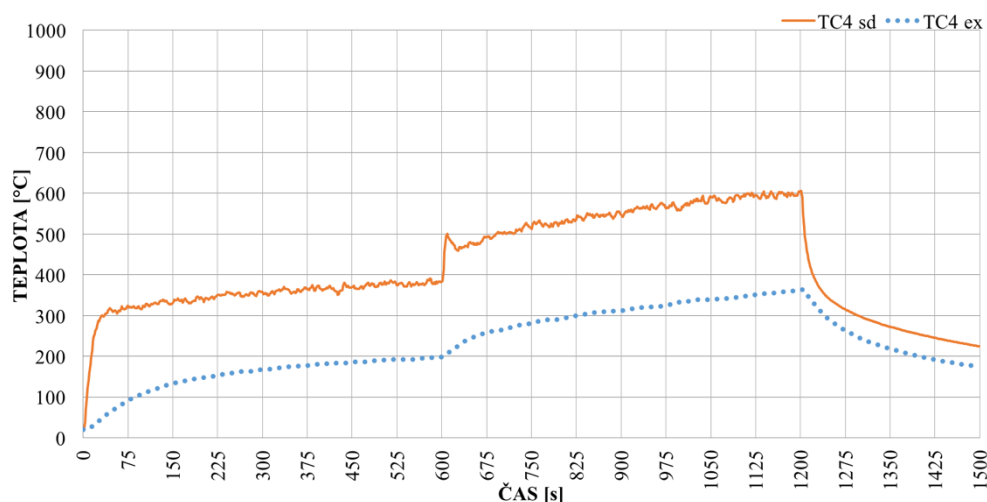


obr. 60: průběhy povrchových teplot na stropě nad hořákem – TC1_{sd} a TC1_{ex} – průměr 3 mm

Další termoelektrické články pro měření povrchových teplot jsou TC4 umístěné uprostřed stropu, na kterých bylo dosaženo následujících hodnot:

- TC4_{sd} max. teplota 605 °C v čase 1202 s 224 °C na konci měření
- TC4_{ex} max. teplota 363 °C v čase 1204 s 173 °C na konci měření

Teploty jsou si podobnější, jak je vidět na obr. 61, ne svými hodnotami, ale křivkami průběhů (nárůsty i poklesy), i když $TC4_{ex}$ nereaguje tak citlivě na zvýšení výkonu hořáku na maximum jako $TC4_{sd}$, kdy po 600. sekundě došlo k prudkému zvýšení teploty, což nejspíš bylo způsobeno prošlehnutím plamenů přes celou místnost až do exteriéru. $TC4_{ex}$ i v tomto případě dosahuje nižších teplot, ale pro změnu po celou dobu, i ve fázi chladnutí.



obr. 61: průběhy povrchových teplot na stropě uprostřed – $TC4_{sd}$ a $TC4_{ex}$ – průměr 3 mm

3.4.2 Teploty plynu

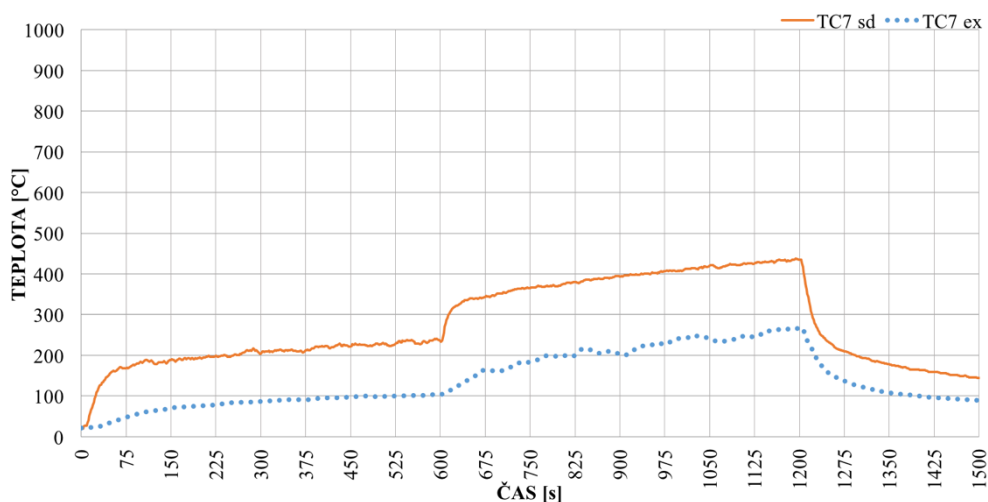
Teploty plynu byly měřeny pomocí termoelektrických článků a deskových snímačů teploty. TC se vyskytovaly ve dvou různých průměrech – 1,5 mm a 3 mm. Rozdílné bylo umístění PT v matematickém modelu, kde byl přímo na stromu a v požárním experimentu, kde byl uchycen blíže ke stěně, jelikož konstrukční provedení neumožnilo původní požadované umístění.

Průběhy teplot plynu získané z matematického modelu už neoscilují tolik jako ty povrchové, jelikož jsou dál od hořáku a neovlivňují je tak moc výkyvy plamene, jako tomu bylo u TC umístěných na stropě zkušební místnosti.

$TC7$ o průměru 1,5 mm v nižší úrovni na stromu, tedy ve výšce 400 mm nad podlahou, dosahovaly následujících hodnot:

- $TC7_{sd}$ max. teplota 437 °C v čase 1194 s 144 °C na konci měření
- $TC7_{ex}$ max. teplota 269 °C v čase 1204 s 89 °C na konci měření

Čas, kdy bylo dosaženo maximálních teplot, se liší jen o 10 s, ale hodnoty jsou rozdílné, jak je vidět na obr. 62. I u těchto $TC7$ mají nárůsty i poklesy podobnou tendenci, reagují zvýšením teploty při zapnutí výkonu hořáku na plnou hodnotu, poté dále teplota roste a chladnou ve stejném pořadí, jako se zahřívaly. Nejvyšší teploty dosahuje po celou dobu opět $TC7_{sd}$. Ve fázi maximálního výkonu hořáku jsou při růstu teplot na $TC7_{ex}$ výkyvy, což může být způsobeno zvýšením odtahu zvonu, pod kterým stála zkušební místnost, nebo pohybem osob v okolí.

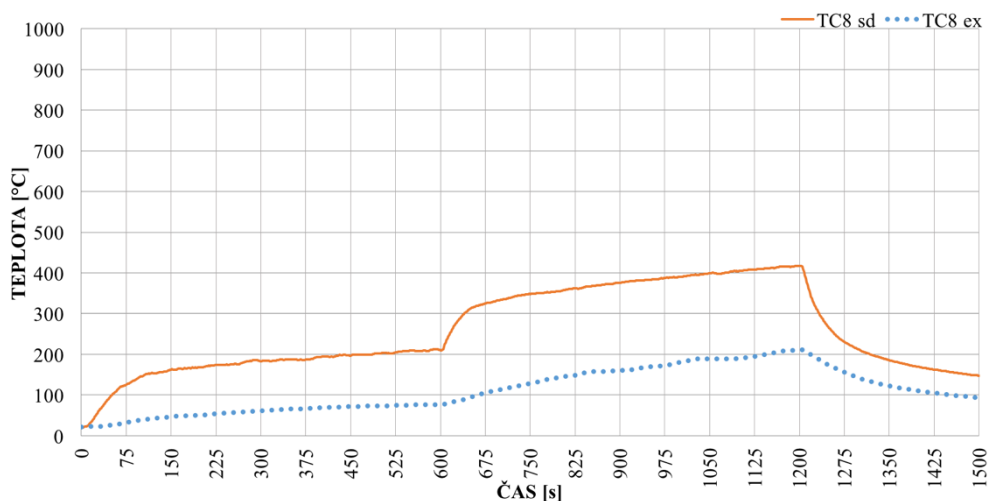


obr. 62: průběhy teplot plynu na stromu ve výšce 400 mm nad podlahou
– TC7_{sd} a TC7_{ex} – průměr 1,5 mm

V podobné výškové úrovni jako TC7, konkrétně ve výšce 375 mm na stromu, byly umístěny TC8 o průměru větším – 3 mm a dosahovaly následujících hodnot:

- TC8_{sd} max. teplota 417 °C v čase 1203 s 147 °C na konci měření
- TC8_{ex} max. teplota 211 °C v čase 1204 s 93 °C na konci měření

Jak je vidět na obr. 63, u těchto TC8 bylo dosaženo maximální teploty pouze s rozdílem jedné sekundy. Po celou dobu si jsou křivky průběhů podobné, opět dosahuje větších teplot TC8_{sd} v matematickém modelu, důvod byl vidět při vizualizaci – prošlehávání plamenů do exteriéru.



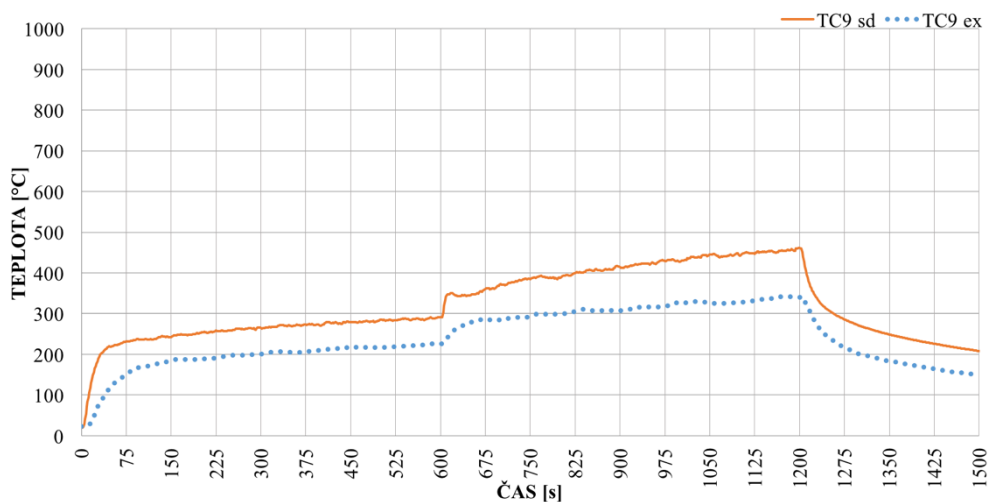
obr. 63: průběhy teplot plynu na stromu ve výšce 375 mm nad podlahou
– TC8_{sd} a TC8_{ex} – průměr 3 mm

Ve vyšší úrovni na stromu byly umístěny další TC o různých průměrech, které dosahovaly vyšších hodnot hned ze dvou důvodů: byly v úrovni vytvořené kouřové vrstvy, kde jsou teploty vyšší a navíc nebyly ochlazovány chladným vzduchem proudícím do místnosti otvorem ve spodní úrovni blíže k podlaze.

Ve vyšší úrovni na stromu ve výšce 625 mm nad podlahou byly umístěny TC9 o průměru 1,5 mm, na kterých bylo dosaženo následujících hodnot:

- TC9_{sd} max. teplota 462 °C v čase 1199 s 208 °C na konci měření
- TC9_{ex} max. teplota 343 °C v čase 1204 s 149 °C na konci měření

Průběhy teplot na obr. 64 jsou si podobné v křivkách i hodnotách, které mají menší rozdíly než v předchozích případech, což je dáno právě polohou v kouřové vrstvě i menším průměrem.

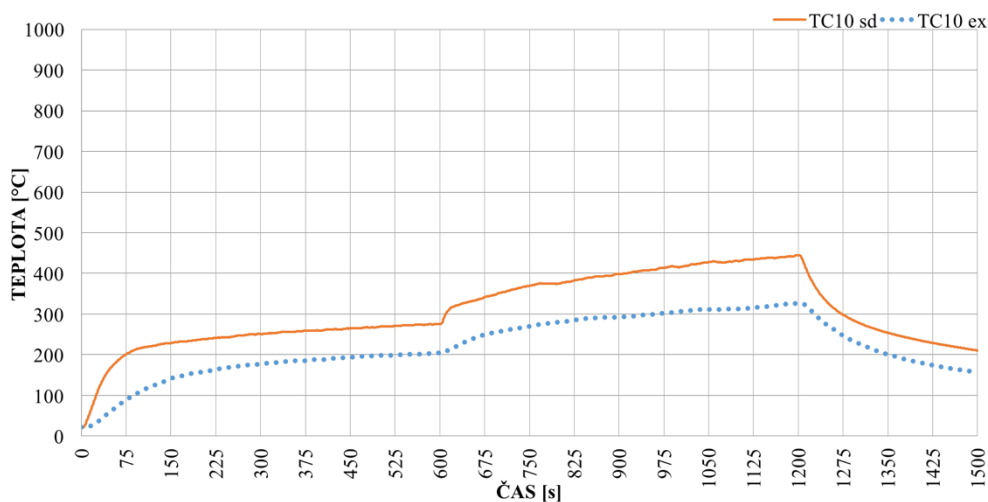


obr. 64: průběhy teplot plynu na stromu ve výšce 625 mm nad podlahou
– TC9_{sd} a TC9_{ex} – průměr 1,5 mm

Poslední na stromu jsou TC10 o průměru 3 mm ve výšce 600 mm nad podlahou. Hodnoty, kterých na nich bylo dosaženo, jsou následující:

- TC10_{sd} max. teplota 445 °C v čase 1203 s 210 °C na konci měření
- TC10_{ex} max. teplota 326 °C v čase 1204 s 156 °C na konci měření

Průběh teplot jsou znázorněny na obr. 65 na následující straně. Hodnoty teplot v tomto případě tolik neoscilují jako u předchozích TC9, jelikož TC10 mají větší průměr a tím pádem si zachovávají stálejší hodnoty i vyšší teploty ve fázi chladnutí. Průběhy mají opět podobné křivky i menší rozdíly teplot než u jinde umístěných TC.

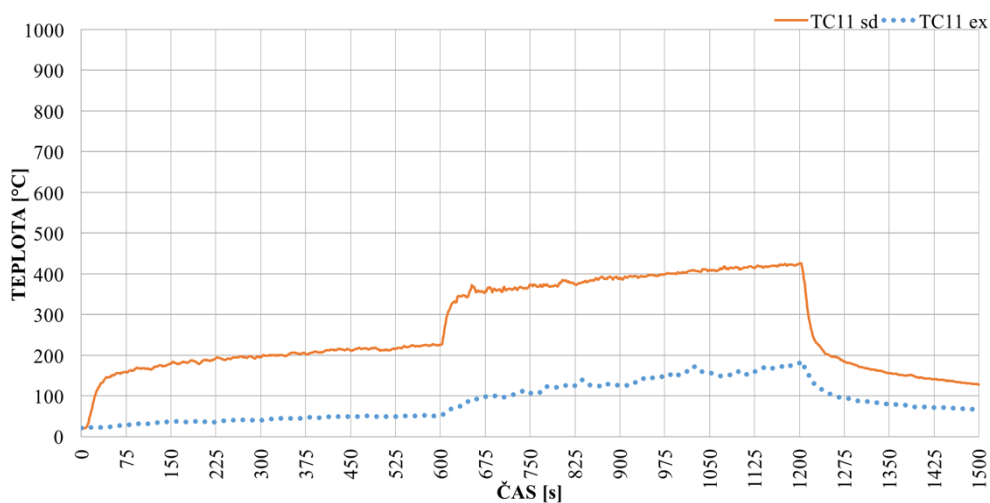


obr. 65: průběhy teplot plynu na stromu ve výšce 600 mm nad podlahou
– TC10_{sd} a TC10_{ex} – průměr 3 mm

Posledními TC, které byly umístěny vedle rychlostních sond v úrovni dveřního otvoru ve výšce 375 mm (stejně jako TC8 o průměru 3 mm) a posunuty od středu o 25 mm ve směru osy Y směrem k počátku, jsou TC11 o průměru 1,5 mm. Tyto TC11 dosahovaly následujících hodnot:

- TC11_{sd} max. teplota 426 °C v čase 1202 s 128 °C na konci měření
- TC11_{ex} max. teplota 186 °C v čase 1204 s 66 °C na konci měření

U průběhů teplot na obr. 66 je vidět znatelný rozdíl v dosažených hodnotách, na TC11_{sd} je dosaženo výrazně vyšších teplot a u TC11_{ex} jsou znatelné výraznější výkyvy teplot kolem stálé hodnoty, což je dáno tím, že TC11_{ex} byl umístěn dále od dveřního otvoru, ne přímo uprostřed, tudíž byl ovlivňován více okolím – ať už zapnutým odsáváním zvonu, pod kterým byla umístěna zkušební místnost, nebo i pohybem osob v okolí.

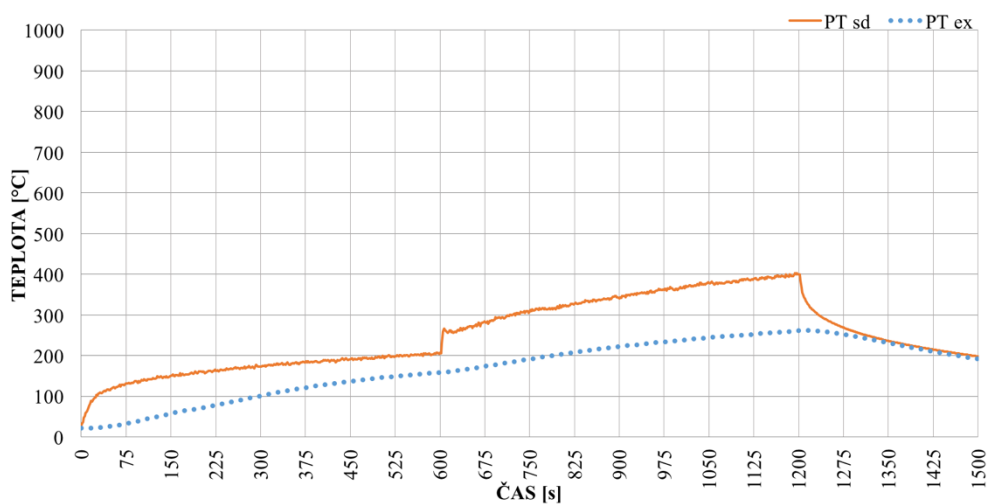


obr. 66: průběhy teplot plynu ve dveřním otvoru ve výšce 375 mm nad podlahou
– TC11_{sd} a TC11_{ex} – průměr 1,5 mm

Posledním měřicím zařízením byly deskové snímače teploty, tedy PT, o rozměrech 100 x 100 mm a bylo na nich dosaženo následujících hodnot:

- PT_{sd} max. teplota 403 °C v čase 1194 s 198 °C na konci měření
- PT_{ex} max. teplota 262 °C v čase 1213 s 192 °C na konci měření

Průběhy teplot naměřených na deskovém snímači jsou znázorněny obr. 67, kde je jasně vidět, že PT_{ex} nereagoval po zapnutí hořáku na maximální výkon, ale průběh je téměř lineární. Po celou dobu dosahoval při zapnutém hořáku nejnižších teplot, pouze na konci fáze chladnutí (tedy s vypnutým hořákem) má teplotu menší jen o 6 °C než PT_{sd} .



obr. 67: průběhy teplot plynu na deskovém snímači o rozměrech 100 x 100 mm – PT_{sd} a PT_{ex}

4 Závěr

V úvodu diplomové práce bylo vysvětleno, proč bylo vybráno zvolené téma, popsány typy požárních zkoušek a zařízení, která se používají pro RCT včetně ukázky dispozice. Dále proběhlo seznámení s problematikou řešenou v jednotlivých kapitolách.

Druhá kapitola o současném stavu poznání zahrnuje bližší popis velkorozměrových požárních zkoušek s konkrétními zkušebními zařízeními v Evropě, principy měření teplot a zařízení, která jsou využívána, v případě této diplomové práce tedy termoelektrické články, deskové snímače teploty a diskové termoelektrické články. U každého typu měřicího zařízení byl popsán princip funkce, konstrukční provedení i možné způsoby využití. U TC byly blíže popsány způsoby instalace a připevnění dle normových požadavků a byl popsán uskutečněný experiment ve Švédsku, který se touto problematikou také zabýval. Poslední částí byla problematika rychlosti proudění plynu, metody měření průtoku a blíže bylo popsáno zařízení používající se v RCT nejvíce – Pitotova trubice (neboli obousměrná rychlostní sonda).

V následující kapitole, která se zabývala experimentálním ověřením řešené problematiky, byly vytvořeny dva matematické modely zmenšeného modelu RCT, které se lišily tím, že jeden neměl dveřní otvor z části zakrytý deskou z minerální izolace a druhý část zakrytou měl – ten byl validován požárním experimentem, který proběhl v požární laboratoři UCEEB ČVUT v Praze. U obou matematických modelů i při požárním experimentu byla použita měřicí zařízení popisována ve druhé kapitole o současném stavu poznání, konkrétně termoelektrické články, deskové snímače teploty a obousměrné sondy. Cílem kapitoly bylo nejen vytvoření matematických modelů a požární experiment, ale také shrnutí zjištěných výsledků pro jednotlivé modely i experiment a následně jeho porovnání s matematickým modelem, podle kterého byla zkušební místnost vytvořena a ve které proběhl.

V této závěrečné kapitole jsou shrnuty poznatky z vytvořených matematických modelů a z provedeného požárního experimentu. Na konci kapitoly jsou sepsána doporučení pro možnou navazující činnost.

4.1 Matematické modely s deskou z minerální izolace ve dveřním otvoru a bez ní

U obou matematických modelů byla zadefinována stejná měřicí zařízení, deskové snímače teploty plynu na stromu, dále termoelektrické články měřící jak povrchové teploty na dvou místech pod stropem, tak měřící teploty plynu na stromu. Posledním zařízením pro měření teplot plynu byly TC ve dveřním otvoru vedle sondy pro měření rychlosti proudění plynu.

Ovlivnění průměrem měřících zařízení ukázalo, že TC s menším průměrem (zde konkrétně s průměrem 1,5 mm) jsou citlivější na působení plamenů, teplého i studeného vzduchu, na rozdíl od těch s průměrem větším (3 mm), které nejsou tak náchylné na změny a svou teplotu si udrží po delší čas.

Vliv umístění byl zkoumán na stromu ve dvou výškových úrovních, kde byly v každé umístěny 2 TC o různém průměru (nad sebou s rozdílem 25 mm). V úrovni blíže k podlaze proudil studený vzduch směrem do místnosti, proto TC dosahovaly nižších teplot než ty výše umístěné, kde naopak teplý vzduch proudil směrem ven.

U PT byl předpokládán delší čas potřebný pro dosažení vyšších teplot kvůli své ploše, ale právě díky ní i lepší schopnost si teplotu udržet i ve fázi chladnutí. U matematického modelu s deskou ve dveřním otvoru to potvrzeno nebylo, když se porovnaly TC na stromu ve vyšší úrovni s PT, ale u druhého matematického modelu, tedy v tom bez desky ve dveřním otvoru, už PT dosahoval po fázi chladnutí teplot vyšších než okolní TC.

Při zkoumání hodnot získaných při výpočtu rychlosti proudění plynu ve dveřním otvoru bylo u matematického modelu bez desky ve dveřním otvoru pozorováno, že vzhledem ke svému umístění se vyskytuje poblíž neutrální roviny, kde téměř k žádnému proudění plynu nedocházelo, ovšem tato poloha neutrální roviny se po přidání desky minerální izolace v matematickém modelu posunula blíže k podlaze, tudíž rychlosti proudění plynu na obousměrné sondě byly ovlivňovány prouděním vlivem přetlaku horkých plynů ven z místnosti pod hranou této vložené desky.

Předpoklad nižších teplot než u matematického modelu s deskou ve dveřním otvoru se u všech měřících zařízení nepotvrdil, především je zajímavá právě nejvyšší povrchová teplota na TC umístěném přímo nad hořákem.

4.2 Požární experiment

Důvodem, proč byl realizován pokus s deskou minerální izolace ve dveřním otvoru bylo to, že výsledky matematického modelu s deskou byly pro provedení zajímavější díky vyšším teplotám u většiny měřících zařízení, vyšší rychlosti proudění plynu i výraznějšímu plamennému hoření ve dveřním otvoru, kde docházelo k hoření nespálených plynů. Co se týče hlavního rozdílu mezi oběma matematickými modely a požárním experimentem, u experimentu nedošlo k prošlehávání plamenů do exteriéru na rozdíl od obou vytvořených modelů.

Měřící zařízení použitá při požárním experimentu vycházela ze stejných typů, průměrů i rozměrů měřících zařízení v matematických modelech. Přidány byly dvakrát na dvou místech TC s průměrem 3 mm měřící povrchové teploty stropu. Důvodem bylo zkoumání způsobu fixace, jak ovlivňuje dotčené TC. Sledovány byly tedy TC bez zvláštního způsobu připevnění, pouze mechanicky kotvené, ale bez zakrytí měřícího bodu – stejné se nacházely v matematických modelech. Nově byl přidán TC připevněný pomocí hliníkové samolepicí pásky, který při požárním experimentu nedosahoval tak vysokých teplot a z TC umístěného přímo nad hořákem v průběhu experimentu při zapnutém hořáku se páska dokonce uvolnila a spadla. Při posledním způsobu fixace byla použita bezazbestová izolační deska Nefalit, která je vyráběna na bázi minerálních vláken. Ta překrývala tedy celkem 2 TC, k těm a ke stropu byla fixována pomocí lepidla Promat® K 84. Ukázalo se, že se jedná o trvanlivější způsob fixace, který vydržel po celou dobu požárního experimentu na obou TC. Co se týče vlivu na dosažení teplot, při použití nad hořákem

byly dosahovány průměrně teploty nejvyšší, uprostřed stropu druhé nejvyšší (menší než u odkrytého TC, ale větší než u hliníkové pásky).

U TC měřících teploty plynu byl opět pozorován vliv průměru a umístění, který stejně ovlivňoval výsledky jako u modelů matematických – v nižších úrovních ochlazoval venkovní vzduch proudící do místnosti instalované TC, v úrovních vyšších byly TC ohřívány teplým vzduchem, který proudil z místnosti ven. Opět byly citlivější na změny teplot TC s menším průměrem 1,5 mm oproti TC s průměrem 3 mm.

PT byl umístěn oproti matematickým modelům blíže ke stěně, ale ve stejné výškové úrovni. Na zapnutí výkonu hořáku na maximum neprojevil reakci výrazným nárůstem teplot, nárůst byl postupný a lineární, ale teplota po fázi chladnutí na něm zůstala nejvyšší oproti TC umístěných vedle něj díky jeho větší ploše.

Zatímco při matematických modelech po proběhnutí výpočtů byly zobrazeny přímo rychlosti proudění plynu v m/s, požárními experimenty jsou při použití obousměrných sond získány hodnoty tlaků na nich naměřených a následně musí být rychlosti proudění plynu počítány. Po proběhnutí tohoto požárního experimentu bohužel naměřené hodnoty nebyly použitelné, protože z konstrukčních důvodů se nepodařilo obousměrnou sondu zafixovat na požadované místo do úrovně dveřního otvoru přímo, ale byla před ním, kde byly hodnoty tlaku téměř nulové.

4.3 Doporučení pro navazující činnost

a) Přepočet tlaku z obousměrných rychlost sond na rychlost proudění plynu

Jelikož z provedeného požárního experimentu nebyly získány použitelné hodnoty, nemohl být proveden přepočet z tlaku na rychlost proudění plynu, jehož princip je v této diplomové práci také řešen. Návrhem pro vytvoření fungujícího souboru vzorců není opakování stejného požárního pokusu s jiným provedením umístění nebo natočení obousměrné sondy. Bylo by dostačující umístit sondu před jakékoli potrubí (uvnitř bez překážek), kterým by proudil vzduch. K obousměrné sondě by se umístil anemometr měřící přímo rychlosti proudění plynu, pomocí něhož by bylo možné následně ověřit správnost výpočtů.

b) Plamenné hoření v programu FDS

V obou matematických modelech došlo k prošlehávání plamenů ze zkušební místnosti do exteriéru, což bylo vidět ve vizualizaci programem Smokeview, ačkoli při požárním experimentu k tomuto jevu nedošlo a ani se k němu po celou dobu fáze, kdy byl hořák na maximální výkon, neschylovalo. Tento nesoulad mezi oběma matematickými modely a požárním experimentem je doporučen pro další zkoumání.

Příloha 1

Zdrojový kód matematického modelu bez desky

```

&HEAD CHID='bez',
TITLE='mini RCT bez desky z minerální izolace'/
*** Čas simulace, palivo, výpočetní oblast ***
&TIME T_END=1500/ 25 minut, 1-10 min 11,1 kW, 11-20 min 33.3 kW, 21-25 chladnutí
&DUMP DT_RESTART=30.0/ ukládání simulace
&REAC FUEL = 'PROPANE'/ palivo
&MESH ID='sit_1', IJK=75,0,32,0,32,0, XB=0,0,1,875,0,0,0,8,0,0,0,8/ vypocetni sit mistnost
&MESH ID='sit_2', IJK=26,32,26, XB=1.225,1,875,0,0,0,8,0,8,1,45/ vypocetni sit prostor
*** Povrch a materiál - požárně odolné desky ***
&SURF ID='STENA', MATL_ID='FERMACELL', COLOR='GRAY', THICKNESS=0.0125, DEFAULT=.TRUE./
SURF ID='STROP', MATL_ID='FERMACELL', COLOR='GRAY', THICKNESS=0.0125/
&MATL ID='FERMACELL', DENSITY=870.0, SPECIFIC_HEAT=0.92, CONDUCTIVITY_RAMP='c_ramp'/
&RAMP ID='c_ramp', T=20.0, F=0.17/
&RAMP ID='c_ramp', T=100.0, F=0.19/
&RAMP ID='c_ramp', T=200.0, F=0.21/
&SURF ID='HORAK', COLOR='RED', HRRPUA=5920.0, RAMP_Q='HORAK_RAMP_Q', PART_ID='SMOKE'/
33.3/(0.075x0.075)
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=0.0, F=0.33/ vykon 11.1 kw
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=600.0, F=0.33/ vykon 11.1 kw
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=601.0, F=1.0/ vykon 33.3 kw
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=1200.0, F=1.0/ vykon 33.3 kw
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=1201.0, F=0.0/ vypnuto
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=1500.0, F=0.0/ vypnuto
&OBST XB=1.2,1.225,0,0,0,8,0,0,0,8, COLOR='GRAY', SURF_ID='STENA'/ stena
&OBST XB=0,0,0.075,0.725,0,8,0,0,0,1, COLOR='BLACK', SURF_ID='INERT'/ horak (BOX)
&VENT XB=0,0,0.075,0.725,0,8,0,1,0,1, SURF_ID='HORAK'/ horak
&HOLE XB=1.2,1.225,0.267,0.533,-0.01,0.667/ dvere
&VENT SURF_ID='HORAK', XB=0,0,0.075,0.725,0,8,0,0,0,0/ horak
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.225,1.865,0,0,0,0,0,0,1.45/ pocatek y - exteriep predni
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.225,1.865,0,8,0,8,0,0,1.45/ konec y - exteriep zadni
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.225,1.225,0,0,0,8,0,8,1.45/ hranice otvor - exteriep
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.865,1.865,0,0,0,8,0,0,1.45/ konec exteriepu
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.225,1.865,0,0,0,8,1.45,1.45/ strop exteriep
*** Měřící zařízení - termočlánky, deskový snímač, pitotka ***
&PROP ID='TC1 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/ nad horakem vlevo, bez fixace
&PROP ID='TC4 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/ střed stropu vlevo, bez fixace
&PROP ID='TC7 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/ strom 0.4
&PROP ID='TC8 props', BEAD_DIAMETER=0.003/ strom 0.375

```

```

&PROP ID='TC9 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/   strom 0.625
&PROP ID='TC10 props', BEAD_DIAMETER=0.003/   strom 0.6
&PROP ID='TC11 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/   vedle pitotky 0.375
&DEVC ID='TC1', PROP_ID='TC1 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.025,0.75,0.8/   nad horakem vlevo,           bez fixace
DEVC ID = 'TC_1', QUANTITY = 'WALL TEMPERATURE', XYZ = 0.025,0.75,0.8, IOR = 3, DEPTH = 0.0/
&DEVC ID='TC4', PROP_ID='TC4 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.575,0.4,0.8/   střed stropu vlevo,   bez fixace
&DEVC ID='TC7', PROP_ID='TC7 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.1,0.1,0.4/   strom 0.4
&DEVC ID='TC8', PROP_ID='TC8 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.1,0.1,0.375/   strom 0.375
&DEVC ID='TC9', PROP_ID='TC9 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.1,0.1,0.625/   strom 0.625
&DEVC ID='TC10', PROP_ID='TC10 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.1,0.1,0.6/   strom 0.6
&DEVC ID='TC11', PROP_ID='TC11 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.2,0.375,0.375/   vedle pitotky o 0.025 ve vyšce 0.375
&DEVC ID='OS', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=1.2,0.4,0.375, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/ pitotka
&PROP ID='PT props', BEAD_EMISSIVITY=0.9/
&DEVC
    ID='PT',
    XYZ=1.1,0.1,0.7,
    QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE GAS',
    ORIENTATION=-1.1,0.1,0.8,
    PROP_ID='PT props'/   deskový snímač teploty ve vzduchu
&BNDF QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/           teplota povrchů
&ISOF QUANTITY='TEMPERATURE', VALUE=550.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.4/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.375/
&PART ID='SMOKE', MASSLESS=.TRUE./
&TAIL /

```

Příloha 2

Zdrojový kód matematického modelu s deskou

```

&HEAD CHID='deska',
TITLE='mini RCT s deskou z minerální izolace'/
*** Čas simulace, palivo, výpočetní oblast ***
&TIME T_END=1500/ 25 minut, 1-10 min 11,1 kW, 11-20 min 33.3 kW, 21-25 chladnutí
&DUMP DT_RESTART=30.0/ ukládání simulace
&REAC FUEL = 'PROPANE'/ palivo
&MESH ID='sit_1', IJK=75,0,32,0,32,0, XB=0,0,1.875,0,0,0,8,0,0,0.8/ vypocetni sit mistnost
&MESH ID='sit_2', IJK=26,32,26, XB=1.225,1.875,0,0,0,8,0,8,1.45/ vypocetni sit prostor
*** Povrch a materiál - požárně odolné desky, izolace ***
&SURF ID='STENA', MATL_ID='FERMACELL', COLOR='GRAY', THICKNESS=0.0125, DEFAULT=.TRUE./
&MATL ID='FERMACELL', DENSITY=870.0, SPECIFIC_HEAT=0.92, CONDUCTIVITY_RAMP='c_ramp'/
&RAMP ID='c_ramp', T=20.0, F=0.17/
&RAMP ID='c_ramp', T=100.0, F=0.19/
&RAMP ID='c_ramp', T=200.0, F=0.21/
&SURF ID='DESKA', MATL_ID='IZOLACE', COLOR='YELLOW', THICKNESS=0.015/
&MATL ID = 'IZOLACE', DENSITY=148.0, CONDUCTIVITY=0.039, SPECIFIC_HEAT=0.84/           Minerální izolace bez
proměnných vlastností závislých na teplotě
&SURF ID='HORAK', COLOR='RED', HRRPUA=5920.0, RAMP_Q='HORAK_RAMP_Q', PART_ID='SMOKE'/
33.3/(0.075x0.075)
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=0.0, F=0.33/           výkon 11.1 kw
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=600.0, F=0.33/       výkon 11.1 kw
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=601.0, F=1.0/       výkon 33.3 kw
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=1200.0, F=1.0/       výkon 33.3 kw
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=1201.0, F=0.0/       vypnuto
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=1500.0, F=0.0/       vypnuto
&OBST XB=0,0,0.075,0.725,0,8,0,0,0.1, COLOR='BLACK', SURF_ID='INERT'/           horak (BOX)
&VENT XB=0,0,0.075,0.725,0,8,0,1,0,1, SURF_ID='HORAK'/           horak
&OBST XB=1,2,1.225,0,0,0.267,0,0,0,8, COLOR='GRAY', SURF_ID='STENA'/           stena bez desky
&OBST XB=1,2,1.225,0.267,0.533,0.667,0,8, COLOR='GRAY', SURF_ID='STENA'/       stena s deskou
&OBST XB=1,2,1.225,0.267,0.533,0,4,0.667, COLOR='YELLOW', SURF_ID='DESKA'/deska izolace
&OBST XB=1,2,1.225,0.533,0,8,0,0,0,8, COLOR='GRAY', SURF_ID='STENA'/           stena bez desky
&OBST XB=0,0,0.075,0.725,0,8,0,0,0.1, COLOR='BLACK', SURF_ID='INERT'/           horak (BOX)
&HOLE XB=1,2,1.225,0.267,0.533,-0.01,0,4/           dveře
&VENT SURF_ID='HORAK', XB=0,0,0.075,0.725,0,8,0,0,0,0.0/ horak
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.225,1.865,0,0,0,0,0,0,1.45/           pocatek y - exteriep predni
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.225,1.865,0,8,0,8,0,0,1.45/           konec y - exteriep zadni
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.225,1.225,0,0,0,8,0,8,1.45/           hranice otvor - exteriep
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.865,1.865,0,0,0,8,0,0,1.45/           konec exteriepu
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.225,1.865,0,0,0,8,1.45,1.45/ strop exteriep

```

```

*** Měřicí zařízení - termočlánky, deskový snímač, pitotka ***
&PROP ID='TC1 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/   nad horakem vlevo,       bez fixace
&PROP ID='TC4 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/   střed stropu vlevo, bez fixace
&PROP ID='TC7 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/   strom 0.4
&PROP ID='TC8 props', BEAD_DIAMETER=0.003/    strom 0.375
&PROP ID='TC9 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/   strom 0.625
&PROP ID='TC10 props', BEAD_DIAMETER=0.003/   strom 0.6
&PROP ID='TC11 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/  vedle pitotky 0.375
&DEVC ID='TC1', PROP_ID='TC1 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.025,0.75,0.8/ nad horakem vlevo,       bez fixace
DEVC ID = 'TC_1', QUANTITY = 'WALL TEMPERATURE', XYZ = 0.025,0.75,0.8, IOR = 3, DEPTH = 0.0/
&DEVC ID='TC4', PROP_ID='TC4 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.575,0.4,0.8/   střed stropu vlevo, bez fixace
DEVC ID = 'TC_4', QUANTITY = 'WALL TEMPERATURE', XYZ = 0.575,0.4,0.8, IOR = 3, DEPTH = 0.0/
&DEVC ID='TC7', PROP_ID='TC7 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.1,0.1,0.4/     strom 0.4
&DEVC ID='TC8', PROP_ID='TC8 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.1,0.1,0.375/   strom 0.375
&DEVC ID='TC9', PROP_ID='TC9 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.1,0.1,0.625/   strom 0.625
&DEVC ID='TC10', PROP_ID='TC10 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.1,0.1,0.6/     strom 0.6
&DEVC ID='TC11', PROP_ID='TC11 props'
QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=1.2,0.375,0.375/   vedle pitotky o 0.025 ve vysce 0.375
&DEVC ID='OS', QUANTITY='VELOCITY', XYZ=1.2,0.4,0.375, ORIENTATION=-1.0,0.0,0.0/ pitotka
&PROP ID='PT props', BEAD_EMISSIVITY=0.9/
&DEVC
    ID='PT',
    XYZ=1.1,0.1,0.7,
    QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE GAS',
    ORIENTATION=-1.1,0.1,0.8,
    PROP_ID='PT props'/ deskový snímač teploty ve vzduchu
&BNDF QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/           teplota povrchů
&ISOF QUANTITY='TEMPERATURE', VALUE=550.0/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBY=0.4/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.375/
&PART ID='SMOKE', MASSLESS=.TRUE./
&TAIL /

```

Příloha 3

Technický list desky Nefalit

inHeat spol. s r.o.
vysokoteplotní izolační materiály

NEFALIT 5

Popis:

Bezasbestové izolační desky Nefalit 5 jsou vyráběny na bázi minerálních vláken. Jsou snadno opracovatelné, k řezání či vrtání není zapotřebí používat speciálních nástrojů. Navlhčené desky se dají ohýbat.



Aplikace:

Výstavba pecí a kotlů v ocelářském a hutním průmyslu. V průmyslu neželezných kovů, energetice, teplárenství, letectví a automobilovém průmyslu.

Typické fyzikální vlastnosti a rozměry:

Deska na bázi minerálních vláken (bez asbestu a keramických vláken)	
Charakteristika	Hodnoty
Barva	běžová
Klasifikační teplota (°C)	750
Objemová hmotnost (kg/m ³)	950
Tepelná vodivost při 400°C (W/m ² K)	0,15
Ztráty žíháním 800°C	14 %
Pevnost v tahu (kg/cm ²)	
podélné vlákna	40
příčné vlákna	30
Permanentní smrštění při 750°C / 24 hodin	< 2 %
Sřlačitelnost dle ASTM F 36 metoda K (70kg/cm ²)	15 %
Standardní toušky (mm)	2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, (+/-10 %)
Standardní rozměry (mm)	1000 x 1000

Informace zde uvedené vycházejí z průměrných hodnot běžné produkce sloužící pouze jako informační pomůcka a nejsou určeny k tomu, aby zakládaly jakékoli právní závazky. Obecně doporučujeme vhodnost materiálu pro zamýšlenou aplikaci odzkoušet.

InHeat spol. s r.o. Spojenců 384, 417 23 Košťany, Česká Republika
Tel: +420 417 533 075, Fax: +420 226 013991
Email: info@inheat.cz, www.inheat.cz

Seznam obrázků

obr. 1: dispozice zkoušky RCT [1]	6
obr. 2: Seebeckův termoelektrický jev [4].....	9
obr. 3: konstrukce termoelektrického článku [5]	10
obr. 4: příklady řešení měřícího spoje termoelektrických článků [6].....	10
obr. 5: provedení konců termoelektrických článků [5].....	10
obr. 6: příčný řez kabelem s minerální izolací [7]	11
obr. 7: podélný řez uzemněným měřicím spojem termoelektrického článku [7]	12
obr. 8: podélný řez neuzemněným měřicím spojem termoelektrického článku [7].....	12
obr. 9: závislost termoelektrického napětí na teplotě pro vybrané termoelektrické články [6]....	14
obr. 10: reální fotografie PT: MTC10 - plášťové termočlánky – bez / s konektorem	15
obr. 11: termoelektrické články bez ochranných trubek.....	15
obr. 12: Cement-On Surface Thermocouples	16
obr. 13: konstrukce deskového snímače teploty: (A) pohled zezadu bez izolace, (B) pohled ze strany [6] (rozměry uvedeny v milimetrech).....	17
obr. 14: umístění deskového snímače v peci [11].....	18
obr. 15: diskové TC [9]: (A) s nepřekrývajícími se vodiči, (B) s překrývajícími se vodiči	19
obr. 16: měření teploty plynu na stromu termoelektrických článků uvnitř požární komory [12]	20
obr. 17: umístění povrchových termoelektrických článků na povrchu stropu [12]	21
obr. 18: metody měření povrchové teploty [13]	22
obr. 19: Test 1: Měření povrchové teploty [13].....	23
obr. 20: Test 2: Měření povrchové teploty [13].....	23
obr. 21: Test 3: Měření povrchové teploty [13].....	24
obr. 22: podrobnosti o odtahovém zařízení pro RCT a umístění vzorkovacích sond [12].....	26
obr. 23: obousměrná sonda – 1 rozdíl tlaků, 2 trubička pro spojení s převaděčem tlaku s proměnnou délkou, 3 svar [12]	27
obr. 24: hodnoty získané obousměrnou sondou versus Reynoldsovo číslo [15]	30
obr. 25: geometrie zkušební místnosti	33
obr. 26: půdorys zkušební místnosti pro matematické modely včetně měřicích zařízení pod stropem, na stromu a v otvoru.....	34
obr. 27: pohled z vnitřní strany místnosti na stěnu s otvorem: (A) provedení použité pro matematický model s deskou z minerální izolace ve dveřním otvoru a pro požární experiment, (B) matematický model bez desky z minerální izolace ve dveřním otvoru.....	35

obr. 28: vizualizace matematických modelů pomocí programu Smokeview 6.6.0:	36
obr. 29: teploty na všech TC i PT v matematickém modelu bez desky	38
obr. 30: průběh teplot na TC měřících povrchové teploty v modelu bez desky – TC1 _{bd} a TC4 _{bd}	38
obr. 31: průběh teplot na TC měřících teploty plynu v modelu bez desky: na stromu TC7 _{bd} o průměru 1,5 mm a TC8 _{bd} o průměru 3 mm, v úrovni otvoru TC11 _{bd} o průměru 1,5 mm	39
obr. 32: průběh teplot na na PT _{bd} a TC měřících teploty plynu v modelu bez desky: na stromu TC9 _{bd} o průměru 1,5 mm a TC10 _{bd} o průměru 3 mm	40
obr. 33: rychlost proudění plynu v OS v matematickém modelu bez desky	40
obr. 34: rychlost proudění plynu uprostřed modelu Y = 0,4 m v čase 1190 s	41
obr. 35: pohled shora – prošlehávání plamene do exteriéru v modelu bez desky v čase 941 s	41
obr. 36: teploty na všech TC i PT v matematickém modelu s deskou	42
obr. 37: průběh teplot na TC měřících povrchové teploty v modelu s deskou – TC1 _{sd} a TC4 _{sd} ..	42
obr. 38: prošlehávání plamenů do exteriéru a odklon plamene od stěn po zapnutí hořáku na maximální výkon: (A) pohled shora, (B) pohled z boku	43
obr. 39: průběh teplot na TC měřících teploty plynu v modelu s deskou: na stromu TC7 _{sd} o průměru 1,5 mm a TC8 _{sd} o průměru 3 mm, v úrovni otvoru TC11 _{sd} o průměru 1,5 mm	44
obr. 40: průběh teplot na na PT _{sd} a TC měřících teploty plynu v modelu s deskou: na stromu TC9 _{sd} o průměru 1,5 mm a TC10 _{sd} o průměru 3 mm	45
obr. 41: rychlost proudění plynu v OS v matematickém modelu s deskou	45
obr. 42: rychlost proudění plynu uprostřed modelu Y = 0,4 m v čase 1083 s	46
obr. 43: fotografie zkušební místnosti	47
obr. 44: půdorys zkušební místnosti pro požární experiment včetně měřících zařízení pod stropem, na stromu, u stěny a v otvoru	47
obr. 45: TC pod stropem pro měření povrchové teploty, vlevo TC pod deskou Nefalit s lepidlem, uprostřed připevněn TC hliníkovou samolepicí páskou, vpravo TC bez zakrytí měřícího bodu mechanicky kotven podložkou a vrutem	48
obr. 46: vnitřek zkušební místnosti s TC pod stropem a propanovým hořákem v rohu	48
obr. 47: datalogger včetně napojení všech měřících zařízení	49
obr. 48: obrazovka počítače pro sledování hodnot v průběhu požárního experimentu	49
obr. 49: anemometr v průběhu měření rychlosti proudění a teploty	50
obr. 50: místnost po cca 4,5 minutách po začátku experimentu při výkonu hořáku 11,1 kW, na zemi u stojanu je měřící tyč pro anemometr	50
obr. 51: tvořící se kouřová vrstva v čase 503 s a plameny dosahující ke stropu	51
obr. 52: kouřová vrstva v čase: (A) 880 s (14,67 min), (B) 889 s (14,82 min)	51

obr. 53: strop a stěny zkušební místnosti po skončení požárního experimentu.....	52
obr. 54: stav TC včetně jejich připevnění po požárním experimentu: (A) TC nad hořákem, (B) TC uprostřed stropu	52
obr. 55: teploty na všech TC v požárním experimentu.....	54
obr. 56: průběh teplot na TC o průměru 3 mm přímo nad hořákem měřících povrchové teploty v požárním experimentu – TC1 _{ex} (bez překrytí), TC2 _{ex} (Nefalit + lepidlo), TC3 _{ex} (hliníková páska).....	54
obr. 57: průběh teplot na TC o průměru 3 mm uprostřed stropu měřících povrchové teploty v požárním experimentu – TC4 _{ex} (bez překrytí), TC5 _{ex} (Nefalit + lepidlo), TC6 _{ex} (hliníková páska).....	55
obr. 58: průběh teplot na TC měřících teploty plynu v požárním experimentu: na stromu TC7 _{ex} o průměru 1,5 mm a TC8 _{ex} o průměru 3 mm, v úrovni otvoru TC11 _{ex} o průměru 1,5 mm	56
obr. 59: průběh teplot na na PT _{ex} a TC měřících teploty plynu při požárním experimentu: na stromu TC9 _{ex} o průměru 1,5 mm a TC10 _{ex} o průměru 3 mm.....	57
obr. 60: průběhy povrchových teplot na stropě nad hořákem – TC1 _{sd} a TC1 _{ex} – průměr 3 mm..	59
obr. 61: průběhy povrchových teplot na stropě uprostřed – TC4 _{sd} a TC4 _{ex} – průměr 3 mm.....	60
obr. 62: průběhy teplot plynu na stromu ve výšce 400 mm nad podlahou – TC7 _{sd} a TC7 _{ex} – průměr 1,5 mm.....	61
obr. 63: průběhy teplot plynu na stromu ve výšce 375 mm nad podlahou – TC8 _{sd} a TC8 _{ex} – průměr 3 mm.....	61
obr. 64: průběhy teplot plynu na stromu ve výšce 625 mm nad podlahou – TC9 _{sd} a TC9 _{ex} – průměr 1,5 mm.....	62
obr. 65: průběhy teplot plynu na stromu ve výšce 600 mm nad podlahou – TC10 _{sd} a TC10 _{ex} – průměr 3 mm.....	63
obr. 66: průběhy teplot plynu ve dveřním otvoru ve výšce 375 mm nad podlahou – TC11 _{sd} a TC11 _{ex} – průměr 1,5 mm	63
obr. 67: průběhy teplot plynu na deskovém snímači o rozměrech 100 x 100 mm – PT _{sd} a PT _{ex}	64

Seznam tabulek

tab. 1: rozměry vyznačených průměrů i tloušťek na obr. 6 [7]	11
tab. 2: tolerance vnějšího průměru v okolí měřicího spoje [7]	13
tab. 3: značení termoelektrických článků dle ČSN EN 60 584-1:2014 [6]	13
tab. 4: základní vlastnosti termoelektrických článků [6]	14
tab. 5: fyzikální hodnoty pro suchý vzduch při tlaku 100 kPa.....	28
tab. 6: seznam měřících zařízení včetně umístění i velikosti.....	32
tab. 7: shrnutí nejdůležitějších dosažených teplot v obou matematických modelech.....	37
tab. 8: shrnutí nejdůležitějších dosažených rychlostí proudění v obou matematických modelech.....	37
tab. 9: shrnutí nejdůležitějších dosažených teplot při požárním experimentu	53
tab. 10: zařízení měřící teploty použitá v požárním experimentu a matematickém modelu s deskou.....	58

Literatura

- [1] Pokorný, Marek, Hejtmánek, Petr, a Najmanová, Hana, *Virtuální CFD model pro Room Corner Test*. Buštěhrad: Energeticky efektivní budovy 2015, symposium Společnosti pro techniku prostředí, 2015.
- [2] Fowell, Andrew J., *Fire and flammability of furnishings and contents of buildings*. Philadelphia, PA: ASTM, c1994. ASTM special technical publication, 1233. ISBN 9780803118898.
- [3] Nováková, Martina, *Charakteristika a příklady aplikací pro velkorozměrovou požární zkoušku „Room Corner Test“*. Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Katedra konstrukcí pozemních staveb.
- [4] Baroň, Roman, *Principy chlazení, chladicí zařízení v průmyslu komerční bezpečnosti*. Zlín, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.
- [5] Spourová, Lucie, Šplíchalová, Lenka, Vopatová, Kristýna, Havlůj, Jan, a Procházka, Martin, *Protokol o zkoušce ocelového vzorku – ocelový nerovnoramenný L profil s izolací z minerální vaty*. Praha, 2017. Semestrální práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí.
- [6] Lišková, Nikola, *Adiabatická teplota povrchu ve vodorovné peci*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí.
- [7] ČSN EN 61515, *Kabely s minerální izolací pro termoelektrické články a plášťové termoelektrické články*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [8] ČSN EN 60 584-1, *Termoelektrické články – Část 1: Údaje napětí a tolerance*. Praha: ÚNMZ, Květen 2013.
- [9] ČSN EN 1363-1, *Zkoušení požární odolnosti - Část 1: Základní požadavky*. Praha: ÚNMZ, Leden 2013.
- [10] ČSN P ENV 1363-3, *Zkoušení požární odolnosti - Část 3: Ověřování charakteristik pecí*. Praha: ÚNMZ, Listopad 1999.
- [11] Wickström, Ulf, *The Plate Thermometer - A Simple Instrument for Reaching Harmonized Fire Resistance Tests*. Fire Technology Second Quarter 1994.
- [12] ISO 9705-1, *Reaction to fire tests – Room Corner Test for wall and ceiling lining products – Part 1: Test method for a small room configuration*. Geneva: ISO copyright office, 2016.
- [13] Lab Report Group PhD., *Mini Room Corner Test*. Lund: VBRN05. Lund University.
- [14] Šolc, Jan, *Experimentální stanovení koeficientu víceotvorové rychlostní sondy*. Brno, 2012. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [15] McCaffrey, B.J. a Heskestad, G., *A Robust Bidirectional Low-Velocity Probe for Flame and Fire Application*. Combustion and Flame 26, 125-127 (1976).

- [16] Pokorný, Marek, *Instalační šachty z požárního hlediska*. Praha, 2012. Disertační práce k získání akademického titulu Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Katedra konstrukcí pozemních staveb.
- [17] *Zapálení2018 - Sborník 1. studentské vědecké konference Fakulty stavební ČVUT v Praze*. Květen 2018. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Katedra konstrukcí pozemních staveb. ISBN 978-80-01-06444-3.