

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vývoj měření a metrologie teplot

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na metrologii a její aplikaci v praxi. Zabývá se také teplotou a jejím měřením, zahrnuje i historický vývoj měření teplot. V práci je rovněž pojednáno o experimentálním měření teplotního profilu na vápenné peci Maerz v reálném čase. Zmiňovaný experiment slouží k nastavení pece dle výrobních a zákaznických požadavků.

Klíčová slova

Metrologie, teplota, teploměr, ITS-90, Kelvin, Celsius, Fahrenheit, Maerz, termočlánek

Abstract

The development of temperature measurement and metrology

The master thesis presents the metrology and its real application. The thesis deals also with the temperature and the measurement of the temperature, it also involves the historical view into the temperature measurement. The thesis enlarges on experimental measurement of temperature profile on the lime kiln Maerz in the real time. The experiment mentioned above serves for setting the kiln to specific production and customer parameters.

Key words

Metrology, temperature, thermometer, ITS-90, Kelvin, Celsius, Fahrenheit, Maerz, thermocouple

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 30.5.2012

Ing. Antonín Franěk

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Olze Tůmové, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

ÚVOD	8
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 DEFINICE POJMŮ METROLOGIE.....	11
1.1 METROLOGIE.....	11
1.2 MEZINÁRODNÍ METROLOGICKÝ SLOVNÍK.....	11
1.3 NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ POJMY METROLOGIE [3].....	12
1.4 METROLOGICKÉ ORGANIZACE.....	14
1.4.1 <i>Metrologické organizace ve světě</i>	14
1.4.2 <i>Metrologické organizace v Evropě</i>	15
1.4.3 <i>Metrologické organizace v ČR</i>	16
1.5 METROLOGIE V ČESKÉM STÁTĚ	17
2 DEFINICE POJMŮ PRO MĚŘENÍ TEPLoty	19
2.1 DEFINICE POJMŮ TERMODYNAMIKA, TEPLota, TEPLo.....	19
2.2 OZNAČENÍ, JEDNOTKY	20
2.3 MĚŘENÍ TEPLoty	20
2.4 TEPLotní STUPNICE	20
2.5 TEPLoměRY	21
2.6 VÝVOJ MĚŘENÍ TEPLot	22
2.6.1 <i>Osmnácté století</i>	23
2.6.2 <i>Devatenácté století</i>	26
2.6.3 <i>Dvacáté století</i>	27
2.7 MEZINÁRODNÍ TEPLotní STUPNICE ITS-90.....	28
3 MĚŘENÍ TEPLotníHO PROFILU NA VÁPENNÉ PEci MAERZ	33
3.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY PECE MAERZ	33
3.2 PRINCIP PECE MAERZ	34
3.3 TEPLotní PROFIL PECE.....	36
3.4 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE A PŘÍSLUŠENSTVÍ	38
3.4.1 <i>Měřicí přístroj Testo 177-T4 [19]</i>	38
3.4.2 <i>Sondy (termočlánky) k přístroji Testo</i>	41
3.5 POPIS POSTUPU MĚŘENÍ.....	42
3.6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	44
4 ZÁVĚR	46
POUŽITÁ LITERATURA.....	47

Úvod

Cílem bakalářské práce je seznámit se s terminologií metrologie a měření teplot. Zahrnuta je i kapitola, která pojednává o historickém vývoji měření teplot ve světě.

Téma bakalářské práce *Vývoj měření a metrologie teplot* jsem si vybral především z toho důvodu, že vzhledem k mé profesi procesního inženýra v technickém úseku na Vápence Čertovy schody a.s., mám k danému zadání možnost využít své zkušenosti přímo z praxe, kde na názorném příkladu vysvětluji princip měření teplotního profilu na vápenné peci Maerz. Z experimentu vyplývá důležitost měření teploty a její dopad na kvalitu při výrobě a zpracování vápence.

Text bakalářské práce je rozdělen do tří částí.

První se zabývá pojmy metrologie a metrologickými organizacemi jak v České republice, tak i ve světě.

Druhá uvádí pojmy z oblasti měření teplot a jeho vývoj v historii od osmnáctého do dvacátého století s názornými příklady experimentování s teplotním měřením u astronomů, filosofů a fyziků, kde se každý z nich pokoušel změřit podle svého názoru teplotu a postupně zdokonaloval prováděná měření a jejich aplikace v praxi. Druhou část doplňuji o aktuálně používanou mezinárodní teplotní stupnici ITS-90, která je stěžejním dokumentem pro měření teplot. Stupnice ITS-90 je v České republice platná od roku 1990.

Třetí část popisuje experiment měření teplotního profilu vápenné pece Maerz, její popis a princip fungování. Dále je zde uveden postup při experimentálním měření teplotního profilu v peci, jeho vyhodnocení a zpracování naměřených dat.

Seznam použitých symbolů a zkratk

α_T	termoelektrický součinitel termočlásku
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
$^{\circ}\text{F}$	stupeň Fahrenheita
$^{\circ}\text{K}$	Kelvinův stupeň (platil do roku 1967)
$^{\circ}\text{R}$	stupeň Rankina
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
AMS	Autorizovaná metrologická střediska
BIPM	Mezinárodní úřad pro míry a váhy
CEN	Evropský výbor pro normalizaci
CENELEC	Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice
ČMI	Český metrologický institut
ČIA	Český institut pro akreditaci
EURAMET	Organizace pro spolupráci národních metrologických institutů v Evropské unii
ETSI	Evropská standardizační instituce pro oblast telekomunikací
ICRM	Mezinárodní komise pro metrologii radionuklidů
IEC	Mezinárodní úřad pro elektrotechniku
ILAC	Mezinárodní organizace pro akreditaci laboratoří
IMEKO	Mezinárodní organizace pro měření
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
ITS-90	Mezinárodní teplotní stupnice
K	kelvin (platí od roku 1967)
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
OIML	Mezinárodní organizace legální metrologie
p	tlak
SI	Mezinárodní soustava jednotek
SKS	Střediska kalibrační služby
T	teplota
T1, T2, T3, T4,	termočlánek
U	napětí
ÚNMZ	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

VIM3	Mezinárodní metrologický slovník
WELMEC	Západoevropská organizace pro spolupráci v legální metrologii
WELAC	Západoevropská spolupráce v akreditaci laboratoří
WECC	Západoevropská spolupráce při kalibracích

1 Definice pojmů metrologie

1.1 Metrologie

Slovo metrologie vzniklo složením dvou řeckých slov: metron, které lze přeložit jako měřidlo a logos, které znamená slovo.

Metrologie je vědní a technický obor, který se zabývá všemi činnostmi týkajícími se měření (měřicími jednotkami a metodami, technikou měření a měřidly a také některými vlastnostmi osob provádějících měření). V užším slova smyslu je to disciplína, která se zabývá zajišťováním jednotnosti a přesnosti měření. Obsahem metrologie jsou zejména měřicí jednotky (soustava jednotek a jejich realizace pomocí etalonů), vlastnosti měření (metody, zpracování výsledků, teorie chyb a nejistot), vlastnosti měřidel a měřicích přístrojů. Do metrologie patří také stanovení fyzikálních a technických konstant.

Metrologie představuje systematické zkoumání, organizaci a využití vhodných metod, pomocí kterých se shromažďují informace z okolního světa. [1]

Metrologie zasahuje významným způsobem do všech odvětví výroby, hospodářství, vědy a ochrany životního prostředí.

1.2 Mezinárodní metrologický slovník

Jako stěžejní terminologický dokument metrologie slouží International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM3), tedy metrologický slovník (dále jen slovník). Terminologie a překlady tohoto dokumentu do národních verzí jsou dále přejímány do národních norem. Platná třetí verze slovníku má označení TNI 01 0115 a byla vydána 1. února 2009.

Překlad slovníku VIM3 obsahuje termíny a definice metrologických pojmů v českém a anglickém jazyce. Ve slovníku je uveden soubor definic a jim příslušejících termínů pro systém základních a všeobecných pojmů používaných v metrologii spolu s pojmovými diagramy pro vysvětlení jejich vztahů. U mnoha definic jsou uvedeny doplňkové informace ve formě příkladů a poznámek.

Slovník je určen k obecnému použití jak pro vědecké pracovníky a techniky, tak také pro odborníky zabývající se plánováním nebo prováděním měření bez ohledu na úroveň nejistoty měření a bez ohledu na obor aplikace. Je také obecně použitelný pro vládní a nevládní orgány, obchodní společnosti, akreditační orgány, řídicí orgány a odborné společnosti.

Slovník je určen k podpoře celosvětové harmonizace terminologie používané v metrologii. VIM3 je rozdělen do pěti kapitol, kde jsou uvedeny termíny a jejich definice v originálu v anglickém a francouzském jazyce. [3]

Kapitoly :

1. Veličiny a jednotky
2. Měření
3. Prostředky pro měření
4. Vlastnosti měřicích zařízení
5. Etalony (standardy měření)

1.3 Nejpoužívanější pojmy metrologie [3]

Justování

Justování je činnost, která zajišťuje, aby funkční stav a správnost měřidla odpovídaly podmínkám používání měřidla. Nastavení a připravení měřidla tak, aby mohlo správně měřit v potřebném rozsahu a s požadovanou přesností. To vše samozřejmě v konkrétním prostředí, kde má měření probíhat.

Kalibrace měřidla

Kalibrace je soubor úkonů, kterými se za specifikovaných podmínek stanoví vztah mezi hodnotami veličin, které jsou indikovány měřicím přístrojem, systémem, hodnotami reprezentovanými ztělesněnou mírou nebo referenčním materiálem a odpovídajícími hodnotami, jež jsou realizovány etalony. Jde o takové činnosti, aby měřidlo, se kterým měříme veličiny, ukazovalo správné hodnoty v návaznosti na příslušný etalon.

Kalibrace (nebo také cejchování) je souhrn operací, jejichž úkolem je zjistit metrologické vlastnosti měřidla a potvrdit, že měřidlo vyhovuje daným předpisům. U některých měřidel a měřicích přístrojů je předpisem (Zákon o metrologii) stanoveno jejich

periodické ověřování.

Kontrola

Kontrola je hodnocení shody pozorováním a posouzením, doplněné podle vhodnosti měřením, zkoušením nebo srovnáváním. Kontrola je taková činnost, při které se zjišťuje, zda bylo uděláno to, co jsme chtěli, nebo bylo dosaženo výsledků, které jsme požadovali.

Metrologická confirmace

Metrologická confirmace je soubor úkonů požadovaných pro zajištění toho, aby měřicí vybavení bylo ve shodě s požadavky na jeho zamýšlené použití. Metrologická confirmace obecně zahrnuje kalibraci nebo ověřování, jakékoli nezbytné seřízení nebo opravu a následnou recalibraci, porovnání s metrologickými požadavky na zamýšlené použití vybavení, stejně jako jakékoli požadované zapečetění a označení štítkem.

Monitorování

Monitorování je opakované a trvalé sledování metrik, funkcí, činností a jiných jevů, za účelem včasné detekce odchylek. Pravidelné monitorování slouží k tomu, abychom měli procesy, činnosti a jiné aktivity firmy pod kontrolou a včas zjistili, že dochází k odchylkám, které mohou firmě způsobit ztráty.

Ověřování

Ověřování je potvrzení prostřednictvím poskytnutí objektivních důkazů, že specifikované požadavky byly splněny. O tom, že skutečně byly všechny požadavky splněny, jsou jednoznačné důkazy.

Ověření měřidla

Ověření měřidla jsou úkony prováděné autorizovaným metrologickým střediskem za účelem zjištění a potvrzení, že měřidlo vyhovuje požadavkům předpisů pro ověření. Zahrnují zkoušku měřidla, opatření měřidla ověřovací značkou, resp. vyhotovení ověřovacího listu.

Přezkoumání

Přezkoumání je činnost prováděná k určení vhodnosti, přiměřenosti a efektivnosti předmětu přezkoumání k dosažení stanovených cílů.

Schvalování

Schvalování je formální vyjádření souhlasu s návrhem nebo potvrzením, že osoba nebo předmět splňují požadavky.

Sledovatelnost

Sledovatelnost je schopnost vysledovat historii, použití nebo umístění toho, co je předmětem úvah. Umožní nám zpětně zjistit, kdy byl výrobek vyroben, z jakého materiálu, kdo kontroloval rozměry apod. O tom, co budeme potřebovat zpětně zjistit, rozhoduje zákazník nebo firma sama.

Validace

Validace je potvrzení prostřednictvím poskytnutí objektivních důkazů, že požadavky na specifické zamýšlené použití nebo na specifickou aplikaci byly splněny. Jedná se o důkaz, že zamýšlené použití postupu (procesu) činnosti je správné. Validace se používá tam, kde není možné použít měření, zkoušky, testy apod., kde tedy nelze jednoduše prokázat, že použití je naprosto správné. Je možné dokladovat, že při dodržení daných činností bylo dosaženo požadovaných výsledků. Při opakování činnosti bychom s vysokou pravděpodobností měli dosáhnout stejných výsledků.

Zkouška

Zkouška je stanovení jedné nebo několika charakteristik (hodnot) podle určitého postupu. Zkouškou chceme zjistit, zda dosahujeme zcela konkrétní veličiny nebo charakteristiky.

1.4 Metrologické organizace

1.4.1 Metrologické organizace ve světě

BIPM	Bureau International des Poids et Mesures Mezinárodní úřad pro míry a váhy
IMEKO	International Measurement Confederation Mezinárodní organizace pro měření

ICRM	International Committee for Radionuclide Metrology Mezinárodní komise pro metrologii radionuklidů
OIML	Organisation International de Métrologie Légale Mezinárodní organizace legální metrologie
ILAC	International Laboratory Accreditation Conference Mezinárodní organizace pro akreditaci laboratoří
ISO	International Standard Organization Mezinárodní organizace pro normalizaci
IEC	International Electrotechnical Commission Mezinárodní úřad pro elektrotechniku

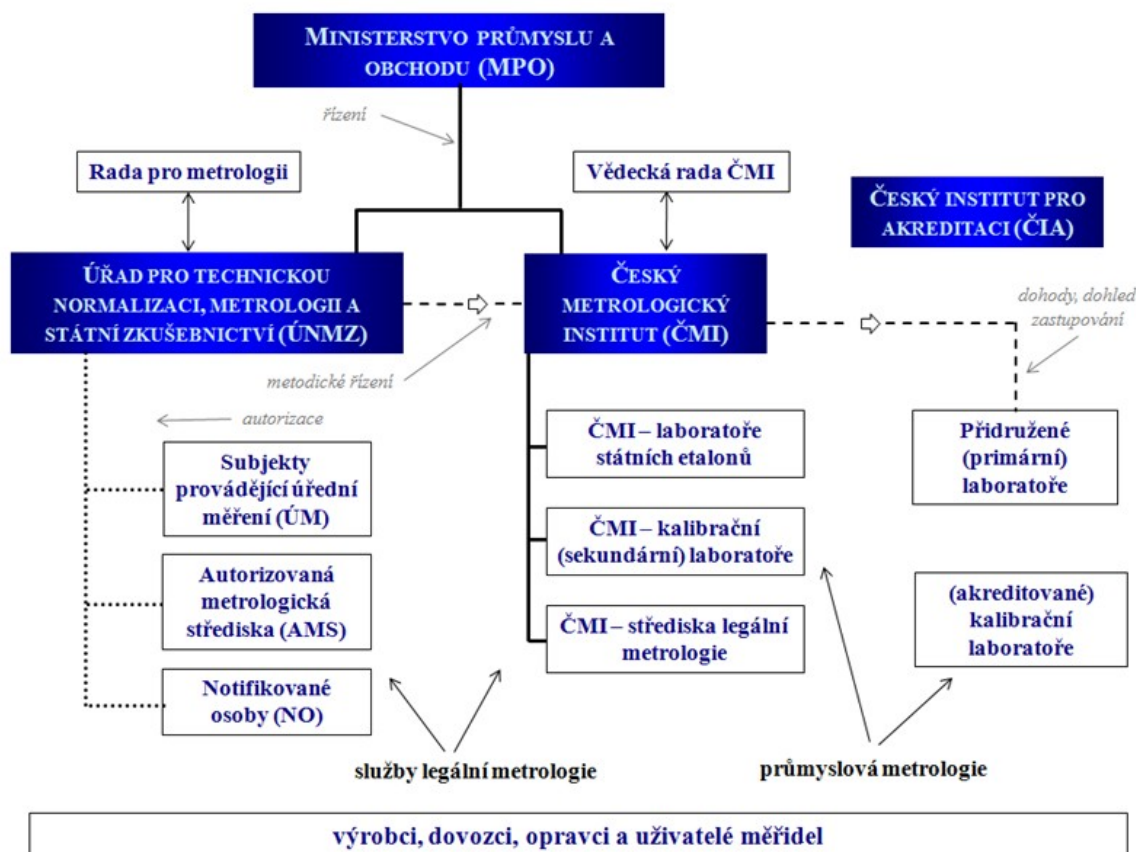
1.4.2 Metrologické organizace v Evropě

EURAMET	The European Association of National Metrology Institutes [8] Organizace pro spolupráci národních metrologických institutů v Evropské unii.
WELMEC	Western European Legal Metrology Cooperation Západoevropská organizace pro spolupráci v legální metrologii
WELAC	Western European Laboratory Accreditation Cooperation Západoevropská spolupráce v akreditaci laboratoří
WECC	Western European Calibration Cooperation Západoevropská spolupráce při kalibracích
CEN	Comité Européen de Normalisation Evropský výbor pro normalizaci
ETSI	European Telecommunications Standards Institute Evropská standardizační instituce pro oblast telekomunikací
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice

1.4.3 Metrologické organizace v ČR

Obrázek č. 1.1 znázorňuje strukturu metrologických organizací v České republice.

Struktura NMS ČR



Obrázek č. 1.1 Struktura NMS ČR (Národní metrologický systém České republiky) [10]

Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR (MPO)

Řídí státní politiku v oblasti metrologie, vypracovává koncepce metrologie a řídí ÚNMZ a ČMI, rozhoduje o opravných prostředcích ÚNMZ. [9]

Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ)

Zajišťuje legislativní činnost. Byl zřízen zákonem České národní rady č. 20/1993 Sb. o zabezpečení výkonu státní správy v oblasti technické normalizace, metrologie a státního zkušebnictví. ÚNMZ je organizační složkou státu v resortu Ministerstva průmyslu a obchodu ČR. Hlavním posláním ÚNMZ je zabezpečovat úkoly vyplývající ze zákonů České republiky upravujících technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví a úkoly v oblasti technických předpisů a norem uplatňovaných v rámci členství ČR v Evropské unii.

Od roku 2009 zajišťuje také tvorbu a vydávání českých technických norem. [10]

Český metrologický institut (ČMI)

Zajišťuje odbornou a výkonnou činnost státní metrologie. Zabezpečuje jednotnost a přesnost měřidel a měření ve všech oborech vědecké, technické a hospodářské činnosti v rozsahu podle § 14 zákona č. 505/1990 Sb. o metrologii, ve znění pozdějších předpisů.

Institut provádí metrologický výzkum a uchovává státní etalony, zajišťuje přenos hodnot měřicích jednotek na měřidla nižších přesností, vykonává certifikaci referenčních materiálů, provádí výkon státní metrologické kontroly měřidel a řadu dalších činností. [11]

Český institut pro akreditaci (ČIA)

Český institut pro akreditaci, obecně prospěšná společnost, je národní akreditační orgán založený vládou České republiky. Poskytuje své služby v souladu s platnými právními předpisy ve všech oblastech akreditace jak státním, tak privátním subjektům. Zajišťuje akreditační systém v České republice. Provádí akreditaci zkušebních a kalibračních laboratoří i středisek kalibrační služby podle Zákona č. 505/1990 Sb. o metrologii v jeho platném znění. Zastupuje ČR v příslušných odborných mezinárodních organizacích. Uděluje a odnímá nebo mění osvědčení o akreditaci, rozhoduje o jeho neudělení či pozastavení. Zpracovává a vydává metodické pokyny z oblasti své působnosti. [12]

Autorizovaná metrologická střediska (AMS)

AMS jsou pracoviště, která splnila podmínky autorizace po stránce organizační, technické a personální. Tato pracoviště provádějí metrologické úkony.

Střediska kalibrační služby (SKS)

SKS jsou organizace, které byly schváleny a akreditovány na základě své žádosti a řízení provedeného ČIA. Tyto organizace provádějí externí a interní kalibrace. [4]

1.5 Metrologie v Českém státě

Vývoj metrologie v Českém státě je stručně shrnut v *Tabulce č. 1.1 Metrologické milníky v Českém státě*.

Tabulka č. 1.1 Metrologické milníky v Českém státě

Rok	Událost
1268	Královské míry - nařízení krále Přemysla Otakara II. o tzv. obnově měř a vah
1358	Karel IV. - úprava měř, praktické rozšíření měř pražských
1549	Ferdinand I. Habsburský - usnesení sněmu, sjednocení délkových a objemových měř a vah - cejchování, zavedení sankcí (1554 bylo usnesení kvůli problémům s prosazením odvoláno)
1614	Matyáš - další usnesení sněmu o sjednocení jednotek
1617	Knížka o měřách zemských - Šimon Podolský z Podolí (1561 - 1617)
1644	Císařský patent Ferdinanda III. shrnující dřívější nařízení
1705	Měřičský spis Ondřeje Bernarda Klausera s definicí jednotek
1765	Císařský patent Marie Terezie zavádí dolnorakouské míry a váhy
1787	Formálně dovoleno používat i staré jednotky (Josef II.)
1872	Zákon č. 16/1872 ř. z., jímž se vydával nový řád měř a vah (novelizace 1876, 1884 a 1893)
1872	Cejchovní řád č. 171/1872 ř. z. (novelizace 1919 a 1940)
1875	Rakousko přistoupilo k metrické konvenci
1918	Československý ústřední inspektorát pro službu cejchovní
1922	Československo přistoupilo k metrické konvenci
1955	Zřízení Státní úřad pro míry, váhy a drahé kovy
1959	Zřízení Úřad pro normalizaci
1962	Zřízení Úřad pro normalizaci a měření
1962	Zákon č. 35/1962 Sb. o měřové službě
1963	ČSN 01 1300 Zákonné měřové jednotky
1963	Vyhláška Úřadu pro normalizaci a měření č. 61/1963 Sb. o zajišťování správnosti měřidel a měření
1966	Zřízení Metrologický ústav v Praze
1967	Vyhláška ÚNM č. 102/1967 Sb., kterou se mění a doplňuje vyhláška č. 61/1963 Sb. o zajišťování správnosti měřidel a měření
1968	Zřízení Československý Metrologický ústav v Bratislavě s pobočkou v Praze (delimitace MÚ)
1975	Novelizace Zákona o měřové službě č. 57/1975 Sb.
1979	Vyhláška o stanovených měřidlech č. 59/1979 Sb.
1980	Soustava jednotek SI (1. 1. 1980)
1990	Zákon o metrologii č. 505/1990 Sb.
1991	Vyhláška č. 69/1991 Sb., kterou se provádí zákon o metrologii
1991	Zřízení Státní metrologický inspektorát
1993	Zákon č. 20/1993 Sb. ČNR o zabezpečení výkonu státní správy v oblasti technické normalizace, metrologie a zkušebnictví
1993	Zřízení Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
1993	Zřízení Český metrologický institut (ČMI)
1995	Obnova a rozšíření soustavy českých národních etalonů a metrologických služeb
1996	ČMI přijat za přidruženého člena EUROMET
1998	ČMI přijat za plnoprávného člena EUROMET
2000	Novelizován zákon o metrologii

2 Definice pojmů pro měření teploty

2.1 Definice pojmů termodynamika, teplota, teplo

Termodynamika jako obor se zabývá vnitřní energií systémů, tzv. tepelnou energií. Stěžejním pojmem termodynamiky je **teplota**. Teplota je jednou ze sedmi základních jednotek Mezinárodní soustavy jednotek (SI). Základní jednotkou teploty je kelvin. [13]

Tabulka č.2.1 Mezinárodní soustava jednotek SI, jednotky SI [5]

Veličina	Základní jednotka SI	
	Název	Značka
Délka	metr	m
Hmotnost	kilogram	kg
Čas	sekunda	s
Elektrický proud	ampér	A
Termodynamická teplota	kelvin	K
Látkové množství	mol	mol
Svítilivost	kandela	cd

Teplota

Význam termínu teplota pochází z latinského slova "*temperatura*", což lze přeložit jako "příjemný pocit".

Tepelný stav tělesa souvisí s velikostí kinetické energie neuspořádaně kmitajících nebo pohybujících se atomů a molekul hmoty. Mírou tepelného stavu tělesa je teplota. Teplo je druh energie, který se vyznačuje teplotou.

Teplota je základní fyzikální veličinou soustavy SI s jednotkou kelvin (K) a vedlejší jednotkou stupeň Celsia (°C). Nejnižší možnou teplotou je teplota absolutní nuly 0 K „kelvinů“, což je vyjádřeno ve stupních celsia -273,15 °C, ke které se lze libovolně přiblížit, avšak nelze jí dosáhnout. K měření teploty se používají teploměry. [16]

2.2 Označení, jednotky

Základní veličiny:

- „T^K“ teplota , základní jednotka 1 kelvin

Základní jednotkou v soustavě SI je 1 kelvin, značka K. 1 kelvin je 273,16-tá část termodynamické teploty trojného bodu vody.

Dalšími používanými veličinami jsou:

- „T^C“ teplota , základní jednotka 1 stupeň Celsia
 $1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ K}$
- „T^F“ teplota, základní jednotka 1 stupeň Fahrenheita,
 $1\text{ }^{\circ}\text{F} = 5/9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (používaný v USA)

Oba výše uvedené vztahy platí pro jednotky teplotního rozdílu, pro vyjádření teploty se však tyto jednotky používají v odlišných stupnicích s jinak nastaveným nulovým bodem. [13]

2.3 Měření teploty

Měřením teploty se zabývá termometrie, která je oborem fyziky, jež se dále věnuje definování teplotních stupnic.

V současnosti se používá Mezinárodní teplotní stupnice z roku 1990 (ITS-90), která je schopna obsáhnout rozsah teplot již od 0,65 K.

2.4 Teplotní stupnice

Následující *Tabulka č. 2.2* uvádí definice nejdůležitějších historických i současných teplotních stupnic pomocí referenčních bodů teploty.

Tabulka č.2.2 Definice teplotních stupnic

Definice teplotních stupnic				
STUPNICE	Kelvinova	Celsiova	Fahrenheitova	Réaunurova
JEDNOTKA	kelvin	stupeň Celsia	stupeň Fahrenheita	stupeň Réaumur
ZNAČKA	K	°C	°F	°Ré, °Re, °R
Dolní referenční teplota	T_0	$T_t(\text{H}_2\text{O})$	$T(\text{chlád.})^{***}$	$T_t(\text{H}_2\text{O})$
HODNOTA	= 0 K	= 0 °C **	= 0 °F	= 0 °Ré
Horní referenční teplota	$T_{tr}(\text{H}_2\text{O})$	$T_v(\text{H}_2\text{O})$	$T(\text{těl.})^{***}$	$T_v(\text{H}_2\text{O})$
HODNOTA	= 273,16 K *	= 100 °C **	= 96 °F	= 80 °Ré
NAVRHL	W. Thomson, lord Kelvin	Ånders Celsius	Gabriel Fahrenheit	R. -A. Ferchault de Réaumur
ROK VZNIKU	1848	1742	1714	1730
OBLAST ROZŠÍŘENÍ	celý svět	celý svět	USA	Záp. Evropa do konce 19. stol.

Legenda k tabulce:

* Původně definována pomocí Celsiovy stupnice (teplotní rozdíl $1 \text{ K} \equiv 1 \text{ }^\circ\text{C}$)

** Referenční body byly v původním návrhu obrácené (podobně jako u Delisleovy stupnice); dnes definována pomocí Kelvinovy stupnice (teplotní rozdíl $1 \text{ }^\circ\text{C} \equiv 1 \text{ K}$)

*** Teplota chladicí směsi ledu, vody a salmiaku nebo mořské soli ($-17,8 \text{ }^\circ\text{C}$) a „tělesná teplota zdravého člověka“ ($36,5 \text{ }^\circ\text{C}$)

2.5 Teploměry

Druhy teploměrů podle funkčního přístupu:

- **Kapalinový teploměr** – k měření teploty se využívá teplotní roztažnosti teploměrné kapaliny. Nejznámější zástupci jsou teploměry rtuťové (při měření vyšších teplot používáme teploměry rtuťové plněné inaktivním plynem pod tlakem až několik megapascalů), lihové, atd.

- **Bimetalový teploměr** - k měření teploty je používán bimetalový pásek. Využívá se zde rozdílné teplotní délkové roztažnosti dvou kovů. Při změně teploty se pásek ohýbá a tento pohyb se přenáší na ručku přístroje.
- **Plynový teploměr** - k měření teploty se využívá závislost tlaku plynu na teplotě při stálém objemu plynu, popř. závislost objemu plynu na teplotě při stálém tlaku.
- **Odporový teploměr** - k měření teploty využívá závislost elektrického odporu vodiče nebo polovodiče na teplotě.
- **Termoelektrický teploměr (termočlánek)** - k měření teploty využívá termoelektrický jev (nejčastěji používané termočláanky měď-konstantan a železo-konstantan). Výhodou je malá tepelná kapacita a možnost měření rychle se měnící teploty. Změnou teploty spoje dvou různých kovů se mění vzniklé termoelektrické napětí. Nejvhodnějším kovem pro odporové teploměry je platina, která se vzhledem ke svému složení mění jen nepatrně.
- **Radiační teploměr (infrateploměr)** - teploměr určený k měření vysokých teplot založený na zákonech tepelného záření (Planckův vyzařovací zákon, Wienův posunovací zákon, Stefanův-Boltzmannův zákon). Měří záření vysílané tělesy do okolí.
- **Kontaktní teploměr** - sepne kontakt při dosažení nastavené teploty. Používá se v regulaci a automatizaci, např. termostat pro klimatizaci nebo akvárium.
- **Maximo-minimální teploměr** - teploměr ve tvaru „U“, který si pamatuje maximální a minimální dosaženou teplotu za sledované období (od posledního nulování). [3]

2.6 Vývoj měření teplot

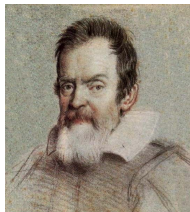
V této kapitole je čerpáno z knihy *Metrologie, její vývoj a současnost*. [4]

Teplota je zdaleka nejvíce měřeným parametrem. Je dopadem fyzikálního, chemického a biologického světa, přesto se její měření poměrně pomalu rozvíjelo.

Intuitivně lidé věděli o teplotě již od pradávna „oheň je horký a sníh studený“. Větší znalosti byly získané při pokusech pracovat s kovy v období doby bronzové a železné. Některé z technologických procesů vyžadovaly určitou míru kontroly nad teplotou. Pro kontrolu teploty ji musíte být schopni změřit.

Přibližně do roku 260 bylo měření teploty velmi subjektivní. Pro horké kovy byla využívána jako ukazatel barva záře. Neexistovala stupnice, kde by teplota mohla být

definována. Je však možné, že existuje v tomto ohledu mezera v historii techniky. Je obtížné se domnívat, že Egypťané, Asyřané, Řekové, Římané nebo Číňané neměřili teplotu nějakým způsobem.



Galileo Galilei (1564 – 1642) byl toskánský astronom, filosof a fyzik těsně spjatý s vědeckou revolucí. Někdy mezi lety 1606–1607 (nebo možná dříve, jiný zdroj uvádí 1597) vyrobil Galileo teploměr, když využil expanze a kontrakce bubliny vzduchu k pohybu vodního sloupce v připojené trubici - využil tepelné roztažnosti vzduchu k měření teploty. Tento jednoduchý teploměr měl skleněnou trubičku, dlouhou asi 30 cm, která byla zakončena baňkou. Baňku zahřál rukou a „teploměr“ (říkalo se mu vzduchový termoskop) vložil otevřeným koncem trubičky do nádoby s obarvenou vodou. Chladnoucí vzduch se smršťoval a vlivem tlaku okolního vzduchu na hladinu voda vnikala do trubičky. Po vychladnutí přejímala baňka teplotu okolního vzduchu a výška vodního sloupce v trubičce se měnila podle změn objemu vzduchu v baňce, který se zase měnil podle teploty vzduchu. Na rozdíl od dnešních teploměrů při oteplení hladina klesala a při ochlazení stoupala. Přístroj ještě neměl stupnici. Zjistil, že hustota tekutin se mění spolu s teplotou. Byl to první zdokumentovaný teploměr. Tento typ teploměru je citlivý, ale je ovlivněn změnami tlaku v atmosféře.

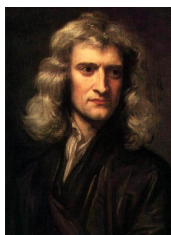
S podobnými teploměry experimentovali i Otto von Guericke a Gaspar Schott. Zdokonalili použití uzavřeného systému se dvěma baňkami na koncích a spojovací trubičkou ve tvaru U, v níž byla tekutina.

Objevily se také teploměry, v nichž je teploměrnou látkou kapalina – první zřejmě sestrojil roku 1631 francouzský lékař Jean Rey, který jako teploměrnou látku použil vodu. Nevýhodou byla malá roztažnost vody.

První lihový teploměr sestrojil toskánský vévoda Ferdinand II. roku 1641.

2.6.1 Osmnácté století

V 18. století bylo vymyšleno 35 různých stupnic pro měření teploty.



Sir **Isaac Newton** (1643 –1727) byl anglický fyzik, matematik, astronom, přírodní filosof, alchymista a teolog, jenž bývá často považován za jednu z nejvýznamnějších osob v dějinách vědy.

Newtonova stupnice je teplotní stupnice, kterou navrhl kolem roku 1700. Vypracoval první kvalitativní stupnici zahrnující asi dvacet referenčních bodů v rozmezí od "studeného vzduchu v zimě po žhavé uhlí v kuchyňském ohni". Tento jeho přístup byl poněkud hrubý a problematický, a proto s ním byl Newton nespokojený. Věděl, že většina kapalných látek má větší objem při vyšší teplotě.



V roce 1701 **Ole Christensen Romer** (1644-1710) vytvořil jeden z prvních praktických teploměrů. Romer použil teploměr červeného vína jako indikátor teploty. Romer vytvořil teplotní stupnici pro jeho teploměr s 0° , která představuje teplotu směsi soli a ledu (asi 259 K). V roce 1676 se Romer stal prvním vědcem, který změřil rychlost světla.



Daniel Gabriel Fahrenheit (1686–1736) byl německý fyzik. Věnoval většinu svého života vytváření přesných meteorologických přístrojů. Když začal sestavovat své první teploměry, používal do nich jako náplň alkohol. Později zjistil, že lepších výsledků se dosahuje s rtutí, a tak začal své teploměry plnit rtutí místo alkoholu. Fahrenheit vynalezl rtuťový teploměr v roce 1714 a později objevil vliv tlaku na bod varu kapaliny.

Fahrenheit původně vytvořil teplotní stupnici, v níž 0° představovala teplotu směsi soli a ledu (asi 259 K), 30° bod mrazu vody (273,15 K) a 90° představuje průměrnou teplotu lidského těla (asi 310 K). Fahrenheit později upravil svou teplotní stupnici tak, že 32° představoval bod mrazu vody a 212° reprezentoval bod varu vody (373,15 K). Tato stupnice

se v některých zemích světa dodnes používá, a to hlavně v USA a na Jamajce. Jednotka se značí °F.



Réne Antoine de Ferchault Réaumur (1683-1757) byl francouzský vědec. Jeho nejznámější objev je lihový teploměr se stupnicí, která nese jeho jméno. V roce 1731 vytvořil jednodušší teplotní stupnici, v níž 0° představoval bod mrazu vody (273,15 K) a 80° představoval bod varu (373,15 K). Teplotní stupnice Réaumur se stala populární ve Francii, ale byla nahrazena teplotní stupnicí Celsia.



Anders Celsius (1701–1744) byl švédský astronom a fyzik. Proslavil se roku 1742, kdy navrhl Celsiovu stodílkovou teplotní stupnici. Jeho stupnice ale byla původně obrácená, bod varu vody měl 0° (373,15 K) a bod mrazu +100° stupňů (273,15 K). Do nám známého tvaru ji obrátil až jeho žák a spolupracovník Carl von Linné.



Carl Linné, po povýšení do šlechtického stavu Carl von Linné nebo latinsky Carolus Linnaeus, (1707 – 1778) byl švédský přírodovědec a lékař, zakladatel botanické a zoologické systematické nomenklatury. Vytvořil také pojem druh jako základ přirozené soustavy organismů.

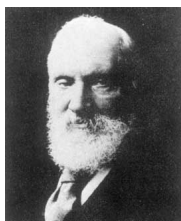
V roce 1744 navrhl obrácený teplotní rozsah než Anders Celsius, od té doby 0° reprezentuje bod mrazu vody (273,15 K) a 100° reprezentuje bod varu (373,15 K). Celsiova relativní teplotní stupnice se postupně stala populární po celém světě. Jednotky Celsia teplotní stupnice byly označeny jako "stupeň Celsia" (symbol °C).

2.6.2 Devatenácté století



Sir **Frederick William Herschel** (1738 - 1822) byl jedním z nejúspěšnějších astronomů všech dob a nejlepším konstruktérem zrcadlových dalekohledů své doby. Zapsal se také do dějin fyziky, protože při svých experimentech se světlem objevil infračervené záření.

Kolem roku 1800 experimentoval Herschel v Anglii se slunečním světlem, kdy pozoroval Slunce přes různě barevná skla. Všiml si, že tepelný vjem není vždy stejný. V důsledku toho provedl experiment s použitím skleněných hranolů rozkládajících sluneční světlo na spektrum na teploměru. S ním testoval jednotlivé barevné části, aby zjistil, které nesou největší množství tepla. Při pokusu posunul teploměr až za konec červené složky světla a očekával, že tepelný efekt vymizí. Navzdory předpokladům vzrostla teplota ještě více než v kterémkoliv z předchozích případů. Tato „neviditelná“ složka světla byla pojmenována infračervená (tj. pod červenou).



William Thomson (1824 - 1907) známý spíše pod svým šlechtickým jménem lord Kelvin of Largs byl skotský fyzik a jeden z nejvýznačnějších fyziků vůbec.

V roce 1848 navrhl absolutní teplotní stupnici, založenou na teorii Sadiho Carnota (Motive Theory of Heat), která přidělí 0° termodynamické absolutní nule a používá stupeň Celsia jako základní jednotku. Toto absolutní měřítko bylo později pojmenováno Kelvinova termodynamická teplotní stupnice a její stupeň kelvin (značka $^\circ\text{K}$, dnes pouze K).



William John Macquorn Rankine (1820 - 1872) byl skotský inženýr a fyzik. S Rudolfem Clausiusem a Williamem Thomsonem (lord Kelvin) spoluzaložil obor

termodynamika. V roce 1859 navrhuje další termodynamickou teplotní stupnici.

Základním bodem stupnice je teplota absolutní nuly které je přiřazena hodnota $0\text{ }^{\circ}\text{R}$, a jeden stupeň Rankina odpovídá stejnému rozdílu teploty jako 1 stupeň Fahrenheita. Teplota tání vody odpovídá hodnotě $491,67\text{ }^{\circ}\text{R}$.



Thomas Johann Seebeck (1770 - 1831) byl německý fyzik. Seebeckův jev (nebo také termoelektrický jev) je přímou přeměnou rozdílu teplot na elektrické napětí a naopak.

Koncem 19. století byla zavedena bimetalová teplotní čidla. Tyto teploměry neobsahují žádné kapaliny. Bimetalový teploměr - teploměr, ve kterém se k měření teploty využívá bimetalový pásek složený ze dvou kovů s různými teplotními součiniteli délkové roztažnosti. Při změně teploty se pásek ohýbá a tento pohyb se přenáší na ručku přístroje. Tyto teploměry nejsou tak přesné jako kapalinové teploměry, zato jsou snadno čitelné a mají širší rozpětí, což je ideální pro mnoho průmyslových aplikací.

2.6.3 Dvacáté století

Ve 20. století byl zaznamenán objev polovodičových součástek, jako jsou: termistory, integrované obvody - senzory a také optické teplotní senzory. 20. století také upřesnilo teplotní stupnice. Teploty lze nyní měřit s přesností asi na $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$.

V roce 1954 na 10. Generální konferenci pro váhy a míry byl zvolen kelvin metrickou jednotkou termodynamické teploty. Kelvin byl pojmenován na počest svého tvůrce, sira Williama Thomson, barona Kelvina z Largs. Konference podle stupně Kelvina přiřadila přesnou hodnotu $273,16\text{ }^{\circ}\text{K}$ k trojnému bodu vody. Trojný bod látky je termodynamická singularita, ve které plyn, kapalina a pevná fáze mohou koexistovat v termodynamické rovnováze. Trojný bod je proto mnohem přesnější než referenční teplotní, buď bod mrazu nebo bod varu.

V roce 1967 na 13. Generální konferenci pro váhy a míry byl změněn název termodynamické jednotky stupeň teploty Kelvin (značka °K) na pouze kelvin (symbol K).

Poslední změna nastala s aktualizací Mezinárodní teplotní stupnice v roce 1990 na **Mezinárodní teplotní stupnice 1990 (ITS-90)**. Obsahuje definici jednotky tepla (kelvin, stupeň Celsia) a 17 teplotních bodů látek (trojný bod, tání, var, ...) a metody ověřování (cejchování) teploměrů.

2.7 Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90

Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 (přijata v roce 1990) překrývá teplotní rozsah od 0,65 K až do nejvyšších prakticky měřitelných teplot s použitím Planckova radiačního zákona. Stupnice ITS-90 je dělena na teplotní rozsahy a podrozsahy. Rozsah stupnice je od 0,65 K až po nejvyšší teploty měřitelné optickým pyrometrem.

Zákon Planckův - emise a absorpce zářivé energie se může dít jen po celistvých násobcích kvanta $e = h \cdot n$, kde n je vlastní frekvence oscilátoru a h "účinkové kvantum", tedy Planckova konstanta h . Neplatí tedy klasický předpoklad, že energie se může sdělovat plynule. Planckův zákon spektrálního (monochromatického) vyzařování lze vyjádřit vztahem:

$$H_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

kde c_1 je první radiační konstanta, λ je vlnová délka záření, c_2 druhá radiační konstanta, T Kelvinova teplota. [13]

Stupnice ITS-90 je založena:

1. na řadě definičních pevných bodů
2. na interpolačních metodách, jež se používají mezi těmito body. Definičními pevnými body jsou teploty určitého počtu termodynamických stavů realizovatelných experimentálně, jež byly přijaty pro označení konvenčních hodnot. Interpolace jsou definovány mezi 0,65 K a 5 K pomocí rovnice tlaku nasycené páry helia, mezi 3 K a 24,5561 K interpolačním stejnoobjemovým plynovým teploměrem, mezi 13,8033 K a 961,78 °C pomocí odporového platinového teploměru a pro teploty vyšší pomocí Planckova vyzařovacího zákona.

Základní rozsahy ITS-90 jsou

- Rozsah 0,65 K až 5,0 K, kde je T_{90} definována tlakem par ^3He a ^4He (rozsah I. viz *Tabulka č. 2.3*).
- Rozsah 3,0 K až 24,5561 K (trojný bod neonu), kde je T_{90} definována plynovým teploměrem pomocí pevných bodů a zvláštních interpolačních postupů (rozsah II. viz *Tabulka č. 2.3*).
- Nejběžnější rozsah 13,8033 K (trojný bod vodíku) až 961,78 °C (bod tuhnutí stříbra) je T_{90} definována pomocí platinových odporových teploměrů (rozsah III. viz *Tabulka č. 2.3*).
- Nad 961,78 °C je T_{90} definována pomocí jednoho teplotního bodu (bod tuhnutí stříbra) a Planckova radiačního zákona (rozsah IV. viz *Tabulka č. 2.3*). [4]

Podrozsahy ITS-90 pod 0 °C (zabezpečované platinovými odporovými teploměry)

- Interval 13,8033 K (trojný bod vodíku) až 273,16 K (trojný bod vody)
- Interval 24,5561 K (trojný bod neonu) až 273,16 K (trojný bod vody)
- Interval 54,3584 K (trojný bod kyslíku) až 273,16 K (trojný bod vody)
- Interval 83,8058 K (trojný bod argonu) až 273,16 K (trojný bod vody)

Podrozsahy ITS-90 nad 0 °C (zabezpečované platinovými odporovými teploměry)

- Interval 0 °C až 961,78 °C (bod tuhnutí stříbra)
- Interval 0 °C až 660,3210 °C (bod tuhnutí hliníku)
- Interval 0 °C až 419,527 °C (bod tuhnutí zinku)
- Interval 0 °C až 231,928 °C (bod tuhnutí cínu)
- Interval 0 °C až 156,5985 °C (bod tuhnutí india)
- Interval 0 °C až 29,7646 °C (bod tání galia)

Tabulka č. 2.3 Seznam pevných teplotních bodů v ITS-90 [5]

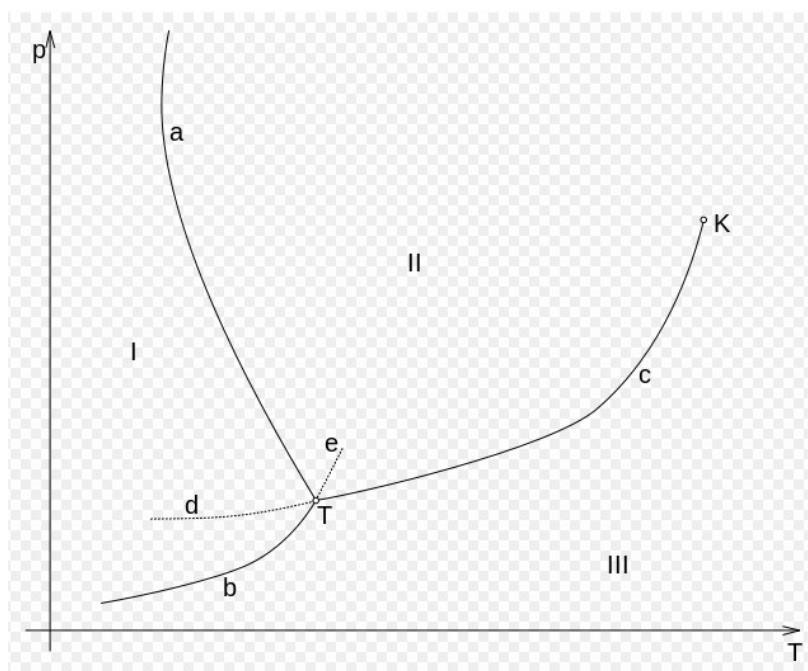
Číslo	Substance a její stav	Definující bod v Kelvinech (rozsah)	Definující bod ve stupních Celsia (rozsah)	Základní rozsah ITS-90
1	tlak vodní páry / teplotní vztah pro helium	3 až 5	-270,15 až -268,15	I.
2	trojný bod vodíku	13,8033	-259,3467	
3	vodík v rovnovážné koncentraci, bod tlaku par	17	-256,15	II.
4	vodík v rovnovážné koncentraci, bod tlaku par	20,3	-252,85	
5	trojný bod neonu	24,5561	-248,5939	
6	trojný bod kyslíku	54,3584	-218,7916	
7	trojný bod argonu	83,8058	-189,3442	III.
8	trojný bod rtuti	234,3156	-38,8344	
9	trojný bod vody	273,16	0,01	
10	bod tání gallia	302,9146	29,7646	
11	bod tuhnutí india	429,7485	156,5985	
12	bod tuhnutí cínu	505,078	231,928	
13	bod tuhnutí zinku	692,677	419,527	
14	bod tuhnutí hliníku	933,473	660,323	IV.
15	bod tuhnutí stříbra	1234,93	961,78	
16	bod tuhnutí zlata	1337,33	1064,18	
17	bod tuhnutí mědi	1357,77	1084,62	

Tato tabulka základních pevných bodů ITS-90 je definována na základě trojných bodů látek, bodů tuhnutí a tání.

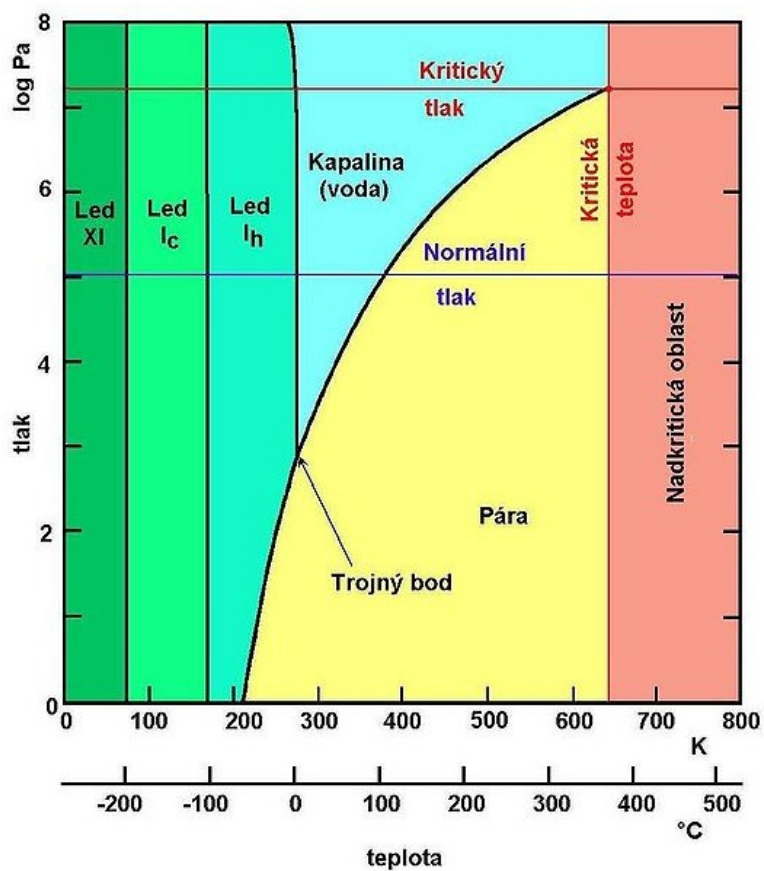
Trojný bod

Trojný bod udává teplotu a tlak, při kterých existuje rovnovážný stav mezi všemi třemi skupenstvími současně, tedy mezi pevnou látkou, kapalinou a plynem. Na fázovém diagramu je určen jako průsečík křivky tání, křivky nasycených par a sublimační křivky (např. bod T na *Obrázku č. 2.1*).

Trojný bod je fyzikální pojem označující bod ve fázovém diagramu (*Obrázek č. 2.1* a *č. 2.2*).



Obrázek č. 2.1 Fázový diagram p - T (trojný bod T – průsečík křivek a, b, c .) [14]



Obrázek č. 2.2 Voda - fázový diagram [15]

Bod tání a tuhnutí

Bod tání, respektive tuhnutí, je nejlépe definován jako rovnovážný stav mezi pevnou a kapalnou fází látky. Tání je přeměna pevné látky na kapalinu a tuhnutí je opak, kapalná látka se mění na pevnou.

3 Měření teplotního profilu na vápenné peci Maerz

V kapitole č. 3 je čerpáno z interní dokumentace k vápenné peci Maerz. [18]

Cílem měření je zjistit skutečný teplotní profil pece dle jednotlivých paliv (plyn, mleté uhlí apod.) a na základě výsledků dokázat vhodně regulovat teplotu v peci.

3.1 Základní parametry pece Maerz

- Výrobce: Maerz Ofenbau AG, Rakousko
- Dvoušachtová souproutá regenerativní pec Maerz na výpal vápna (viz *Obrázek č. 3.1*)
- Kapacita pece : 600 t/d
- Přepočít: z 1000 kg vápence -> 572 kg vápna
- Vsázka během jednoho cyklu: 4650 kg x 2



Obrázek č. 3.1 Vápenná pec Maerz

Rozměry pece a výšky jednotlivých pásem jsou uvedeny v následující *Tabulce č. 3.1*

Tabulka č. 3.1 Rozměry pece Maerz

Pec	Průměr šachty	Přehřívací pásmo	Pálící pásmo	Chladicí pásmo
Maerz	4,3 m	3,2 m	8,3 m	5,4 m

Pec Maerz byla v roce 1995 spuštěna do provozu na zemní plyn. Olejofikace, která umožnila využívání kapalných paliv, byla následně provedena v roce 1999.

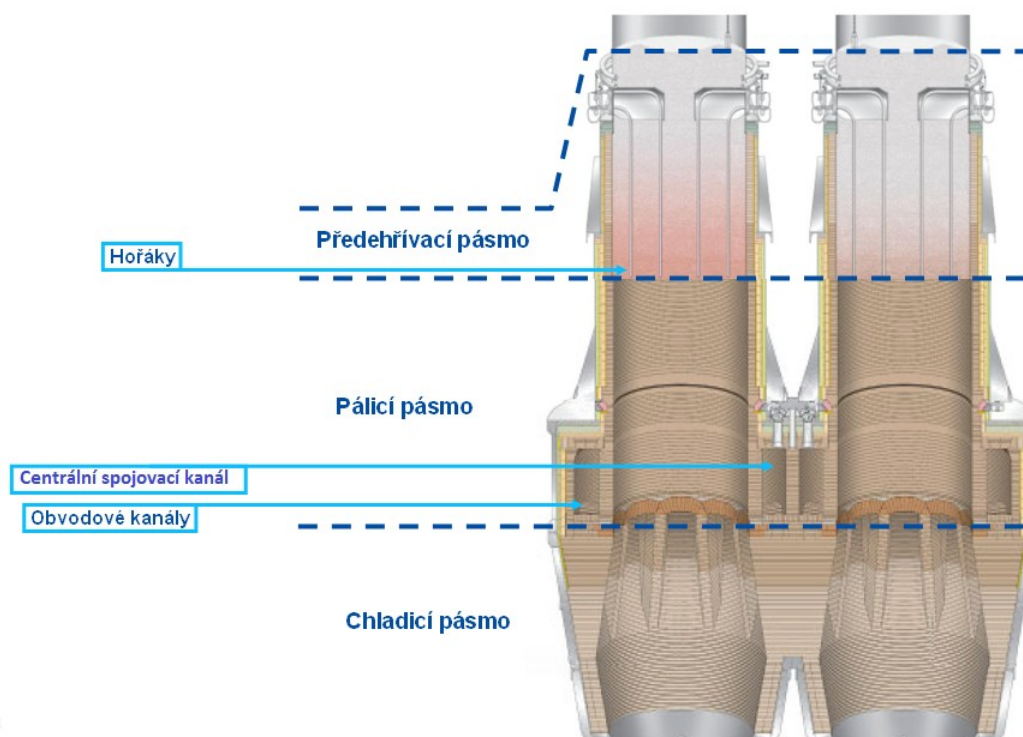
3.2 Princip pece Maerz

Postup kamene a jeho přeměna na vápno

Vsázka vápence je cyklicky dávkována do horní části obou šachet. V přehřívací části (viz *Obrázek č. 3.2*) se kámen přehřeje až na teplotu cca 800 °C a postupuje do pálícího pásma (viz *Obrázek č. 3.2*), na jehož horní hranici jsou umístěny hořáky. Teplota v pálícím pásmu se pohybuje mezi 900 °C a 1300 °C. Při této teplotě se vápenec rozkládá, přičemž uniká uvolněný oxid uhličitý, který se mísí se spalinami. Po průchodu pálícím pásmem vápno postupuje do chladicího pásma, kde se protiproudně proudícím vzduchem postupně vychladí z teploty kolem 1000 °C až na teplotu kolem 60 °C. Vychlazené vápno se z dolní části šachet periodicky odtahuje k dalšímu zpracování. Postup vsázky je relativně pomalý a při nominálním výkonu pece je zdržení v jednotlivých pásmech pecí následující (viz *Tabulka č. 3.2*).

Tabulka č. 3.2 Zdržení materiálu v pásmech pece

Pásmo	Doba pobytu (hodiny)
Přehřívací	6
Pálící	9
Chladicí	9



Obrázek č. 3.2 Řez pece Maerz - pásma pece

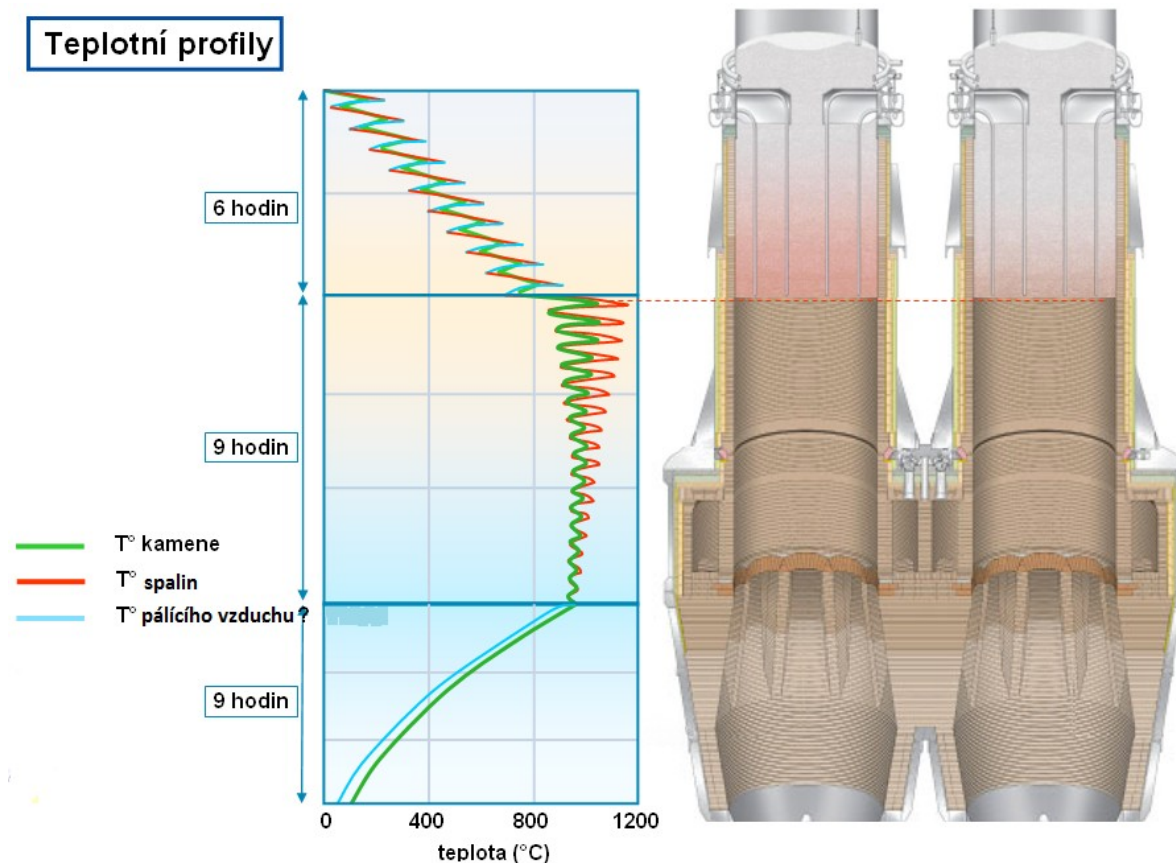
Dávkování paliva a postup spalin

Palivo je přiváděno do hořáků vždy jedné z šachet umístěných v horní části pálicího pásma, kde hoří při teplotě cca 1300 °C. Spalovací vzduch vstupuje do této šachty vrchem pece a postupuje předehřátou vrstvou vsázky dolů do prostoru hořáků, kde umožňuje hoření paliva. Spaliny postupují šachtou směrem dolů, ochlazují se na teplotu cca 1050 °C, zároveň se mísí s uvolněným oxidem uhličitým z rozkladu vápence, následně vstupují do rozšířené části pece (rozhraní pálicího a chladicího pásma), kde se smísí s chladícím vzduchem ohřátým na teplotu cca 950 °C a vstupují do spojovacího kanálu mezi oběma šachtami. Ze spojovacího kanálu vstupují spaliny do druhé z šachet, postupují vzhůru přes pálicí pásmo druhé šachty (teplota 900-1200 °C) a i zde se obohacují o uvolňující se CO₂ z rozkladu vápence. Po opuštění pálicího pásma postupují k vrcholu pece, přičemž odevzdají teplo předehříváné vsázce a ochladí se z cca 1200 °C až na teplotu 110 – 180 °C. S touto teplotou vstupují spaliny přes odtahové potrubí do tkaninového filtru a dále přes odtahový ventilátor do komína. Doba zdržení spalin při teplotě nad 850 °C je vyšší než 2 sekundy, jak je garantováno výrobcem pece Maerz. Funkce obou šachet se cyklicky mění v periodě cca 15

min.

3.3 Teplotní profil pece

Na základě měření z provozu pece Maerz vypadá její teplotní profil tak, jak je znázorněno na *Obrázku č. 3.2*.

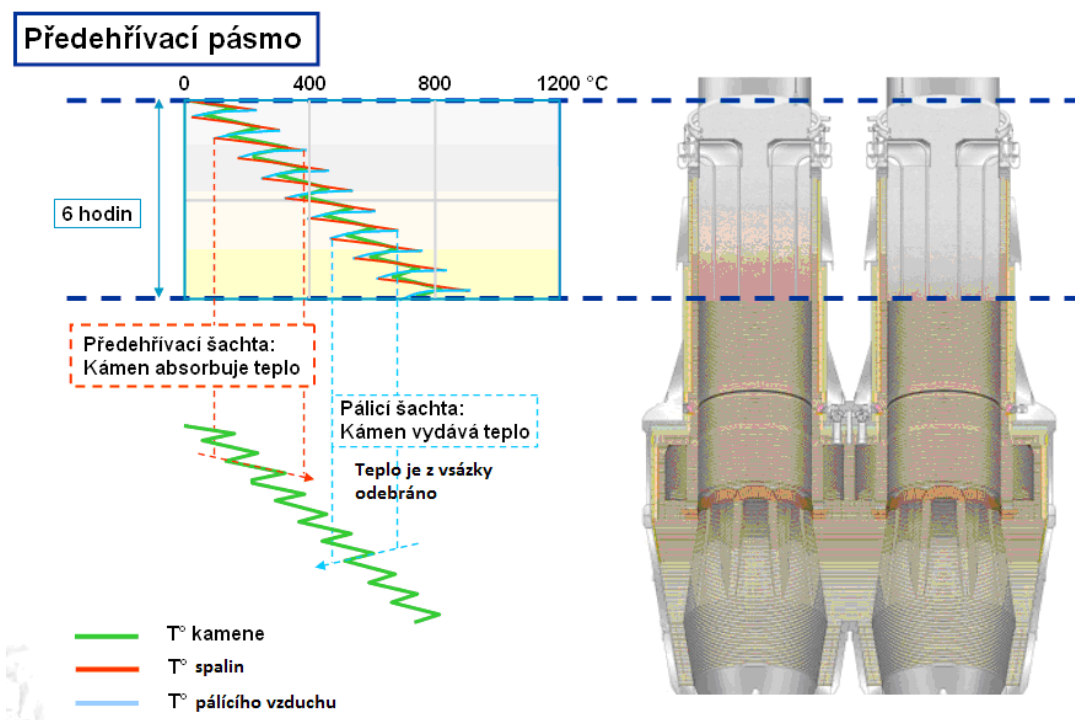


Obrázek č. 3.2 Celkový teplotní profil pece

Teploty v jednotlivých pásmech

Přehřívací pásmo

V přehřívacím pásmu dochází k vysušení materiálu a ohřevu kamene: z 20 °C na cca 900 °C. Doba zdržení kamene v přehřívacím pásmu: +/- 6 hodiny (viz *Obrázek č. 3.3*).



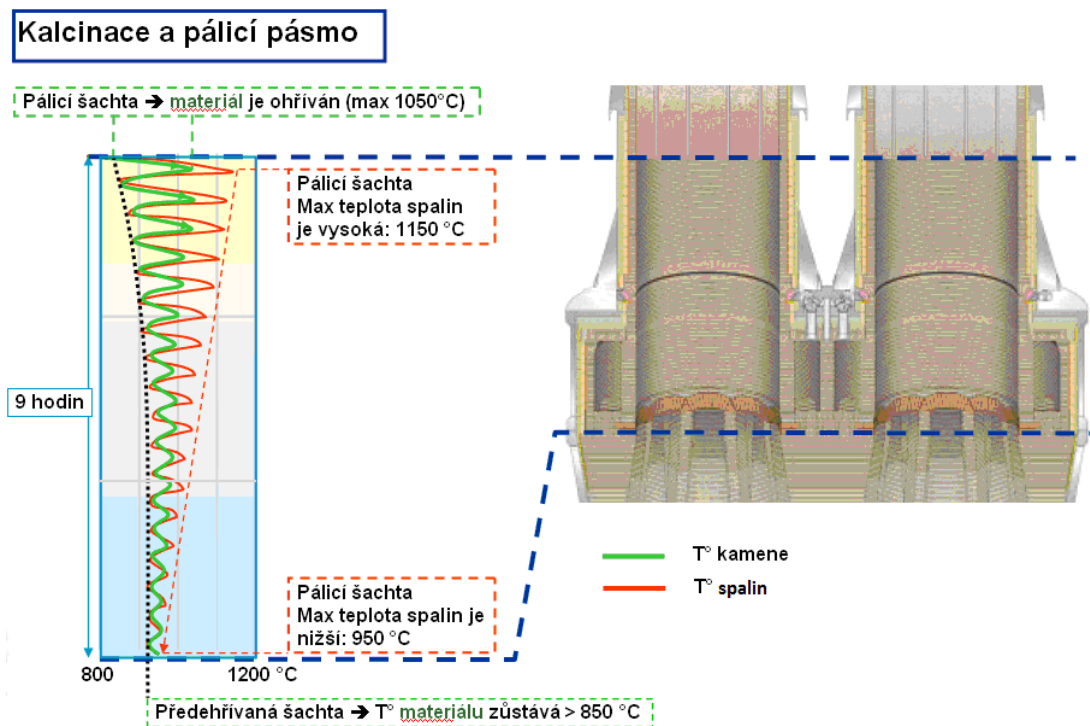
Obrázek č. 3.3 Předehřivací pásma – teplotní profil

Pálicí pásma

V pálicím pásmu musí teplota materiálu přesáhnout 900 °C, aby došlo k výpalu kamene, tzv. kalcinaci.

Kalcinace: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

Doba zdržení kamene v pálicím pásmu: +/- 9 hodin (viz Obrázek č. 3.4).

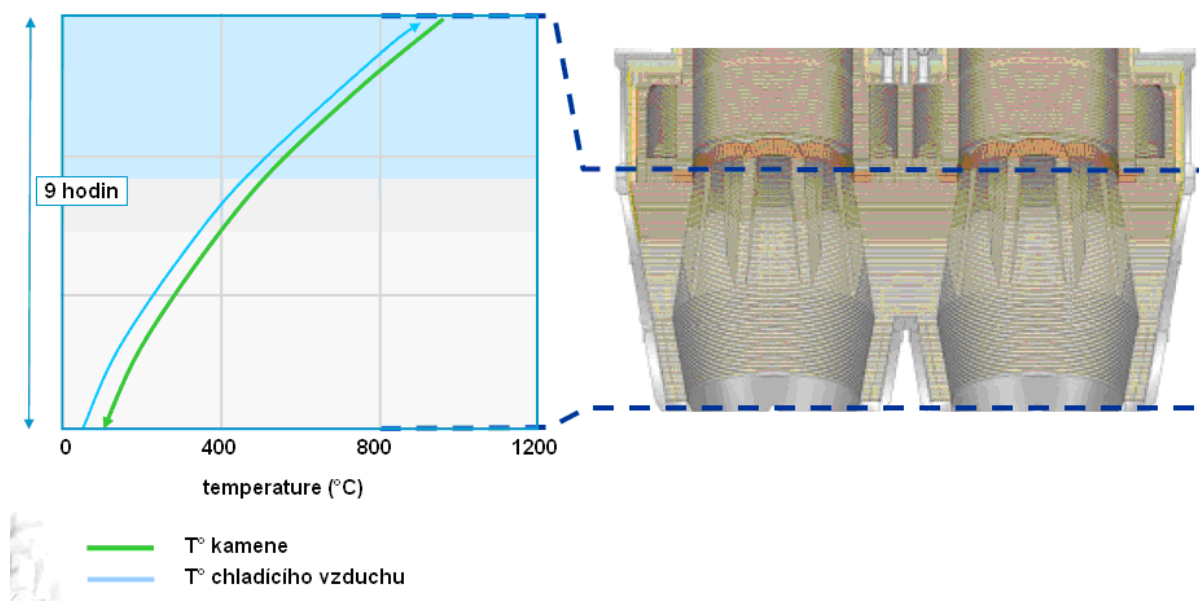


Obrázek č. 3.4 Pálicí pásma – teplotní profil

Chladicí pásma

V chladicím pásnu je účelem ochladit vápno ($> 900\text{ °C}$) tak, aby ho bylo možné transportovat a uložit do sil. Doba zdržení v chladicím pásnu: ± 9 hodin (viz *Obrázek č. 3.5*).

Chladicí pásma



Obrázek č. 3.5 Chladicí pásma – teplotní profil

3.4 Měřicí přístroje a příslušenství

Měření bylo provedeno přístrojem a sondami s následujícími parametry.

3.4.1 Měřicí přístroj Testo 177-T4 [19]

Profesionální záznamník Testo 177-T4 se 4 vstupy pro externí teplotní sondy (viz *Obrázek č. 3.6*) slouží k současnému měření teplot na různých místech. Měří teplotní výkyvy, které často ovlivňují celkový výsledek při výrobním procesu. Lze k němu připojit různé druhy sond, např. povrchové, ponorné a sondy okolního vzduchu.

Základní funkce přístroje:

- Speciálně pro použití při vysoké a nízké teplotě
- Vyčtení dat bez přerušení sady měření
- Vyhodnocení dat tabulkově nebo graficky, s funkcí e-mailu
- Paměť pro až 48 000 naměřených hodnot
- Sběr dat na místě, vyčtení a vyhodnocení na PC
- Alarm, spolehlivé předání informace o překročení hraniční hodnoty



Obrázek č. 3.6 měřicí zařízení Testo 177/T4

Technické parametry

- Veličina: teplota (°C / °F)
- Senzor: TE-typ K / T (4× ext.)
- Počet kanálů: 4 (ext.)
- Měřicí rozsah:
 - 100 až +1000°C (typ K)
 - 100 až +400 °C (typ T)
- Rozlišení: 0,1 °C
- Přesnost přístroje: ±0,3 °C (-100 až +70 °C)
- ±1 digit: ±0,5 % z naměřené hodnoty (+70 až +1000 °C)
- Paměť: 48 000 hodnot
- Provozní teplota: 0 až +70 °C
- Skladovací teplota: –40 až +85 °C
- Baterie: lithiová (1AA)
- Životnost baterie: cca 5 let

- Rozměry: 103×64×33 mm
- Hmotnost: 129 g
- Materiál pláště: ABS
- Třída ochrany: IP 43

Řada Testo 177 sestává z 5 modelů, které mohou být využity v široké škále aplikací, především při dlouhodobých měřeních, kdy mohou využít velké kapacity paměti pro ukládání dat. Všechny záznamníky, které mají display, mohou bezprostředně poskytovat rychlý přehled o poslední uložené hodnotě.

Nesmazatelná paměť pro bezpečné uložení dat

Paměť EEPROM, kterou jsou vybaveny záznamníky Testo 177, Vám zaručuje, že žádná naměřená data nebudou ztracena ani při úplném vybití nebo výměně baterie. Program ComSoft 3 dopočítává zbývající životnost baterie podle nastaveného kroku měření, což je velká výhoda pro účinné a kontrolované měření.

Spolehlivost

Všechny záznamníky jsou vybaveny funkcí reálného času (RTC) s přesností ± 2 minuty za měsíc. Robustní kryt z ABS s protiskluzovou úpravou povrchu zvyšuje ochranu před vlhkostí a mechanickým poškozením. Některé modely mají ochrannou třídu krytí elektroniky IP 68 - odolnost proti tlakové vodě. Je možné je zajistit visacím zámkem proti nepovolené manipulaci.

Kalibrace

V mnoha průmyslových i potravinářských aplikacích je požadováno použití kalibrovaných přístrojů. Testo nabízí provedení kalibrací v návaznosti na státní etalon (ISO kalibrace) podle požadavků norem ISO 9001, HACCP, GMP, FDA, VDA 6.1, ISO TS 16949 i kalibrace v akreditované laboratoři.

Program kompatibilní s Windows

Programy ComSoft 3 - Basic a ComSoft 3 – Professional umožňují bezpečné a rychlé uložení a zpracování naměřených dat. Záznamník může mít nastaveno spuštění měření po stisknutí tlačítka na přístroji, k určitému datu nebo přímo z PC. Záznamník může být nastaven na provedení zvoleného počtu měření, může automaticky ukončit měření při

zaplnění paměti nebo do paměti ukládá nové hodnoty (s přepisem nejstarších dat).

3.4.2 Sondy (termočlánky) k přístroji Testo

Pro měření vysokých teplot se používá kombinace kovů, které kromě vysokého termoelektrického součinitele mají i odpovídající mechanické vlastnosti a odolnost proti oxidaci.

Termočlánek je tvořen dvojicí kovů (A a B) spojených na jednom konci. Tento konec je umístěn na teplotě měření (T_m), rozpojené konce jsou udržovány na teplotě referenční (T_r) a termoelektrické napětí je měřeno právě mezi těmito rozpojenými konci.

Pro toto platí vzorec :

$$U_{AB} = \alpha_T^{AB} (T_m - T_r)$$

α_T^{AB} termoelektrický součinitel termočlánku

Výběr vodičů vhodných termočlánků závisí na těchto pracovních podmínkách:

- rozsah měřených teplot
- požadovaná přesnost měření
- chemická odolnost vůči agresivnímu prostředí
- požadovaná životnost termoelektrického článku

Typy sond

K přístroji je možno připojit následující sondy.

- **typ sondy Typ T (Cu-CuNi)**

Měřicí rozsah: -200 až $+400$ °C

- **typ sondy Typ K**

Měřicí rozsah: -200 až $+1000$ °C

Přesnost:

$\pm 0,5$ % z naměřené hodnoty ($+70,1$ až $+1000$ °C)

$\pm 1,5$ % z naměřené hodnoty (-200 až $-100,1$ °C)

$\pm 0,3$ °C (-100 až $+70$ °C)

Rozlišení: $0,1$ °C

- **typ sondy Typ J (FeCuNi)**

Měřicí rozsah: -100 až $+750$ °C

Použitá sonda k měření na peci Maerz

Pro naše měření jsem vybral vhodnou sondu s následujícími parametry:

Plášťový termočlánek s připojeným vedením, typ K.

Typ K inc60/M3/30 000/SCI/C11

- průměr 6,0mm, 1x"K - NiCr-Ni", plášť Inconel 60, třída přesnosti 1
- délka 30 m
- připojené kompenzační vedení silikon $2 \times 0,22 \text{mm}^2$ lanko, délka 15m, na konci může být konektor typ mini Omega nebo volné vývody
- měření do 1260 °C, po této teplotě se termočlánek roztaví
- 4 kusy

3.5 Popis postupu měření

Před vlastním měřením je nutné si připravit 4 sondy (Typ K inc60/M3/30 000/SCI/C11) a záznamník teploty Testo 177/T4. Je potřeba provést nastavení záznamníku pro 4 termočláanky. Je požadováno, aby během měření nebylo možné zařízení vypnout - proto byla nastavena na zařízení pouze komunikace a ovládání přes notebook a tlačítka na záznamníku byla deaktivována. Toto je velice důležité nastavení, protože pokud by došlo k jakémukoli přerušení měření, tak lze jen těžko vyhodnotit reálné výsledky teplotního profilu. Navíc by byly zničeny 4 sondy, jejichž cena není zanedbatelná (1 termočlánek = 22 000 Kč bez DPH). Ještě před příchodem na pec Maerz jsou na termočláncích označeny stupně po 1 metru, aby bylo možné mít přehled, o jakou délku jsou jednotlivé termočláanky vtaženy vsádkou do pece. Poté jsou napojeny přes konektory do záznamníku teploty TESTO viz *Obrázek č. 3.7*.



Obrázek č. 3.7 Připojení termočlánku přes kompenzační vedení do teplotního záznamníku Testo 177/T4

Je nutné otevřít připravené otvory, do kterých jsou termočlánky zasunuty, a vyčkat, dokud nedojde k zafixování sond do vsádky kamene. Poté je nutné spustit přes počítač měření na záznamníku TESTO a počítač od měřicího přístroje odpojit viz Obrázek č. 3.8.



Obrázek č. 3.8 Nastavení záznamníku teploty Testo 177/T4 a spuštění měření

Termočlánky jsou pak strhávány spolu s kamením v peci a monitorují nám teplotní profil pece viz Obrázek č. 3.9. Na záznamníku jsou po časových periodách (20 sekund) zaznamenávány teploty jednotlivých sond po dobu testu 24 hodin. Po dosažení spodní vrstvy pece se sondy od záznamníku odpojí a výsledky přenesou do počítače. Veškeré údaje

se vyhodnotí v SW Microsoft Excel verze 2003.



Obrázek č. 3.9 Zasunutě termočlánky do pece Maerz

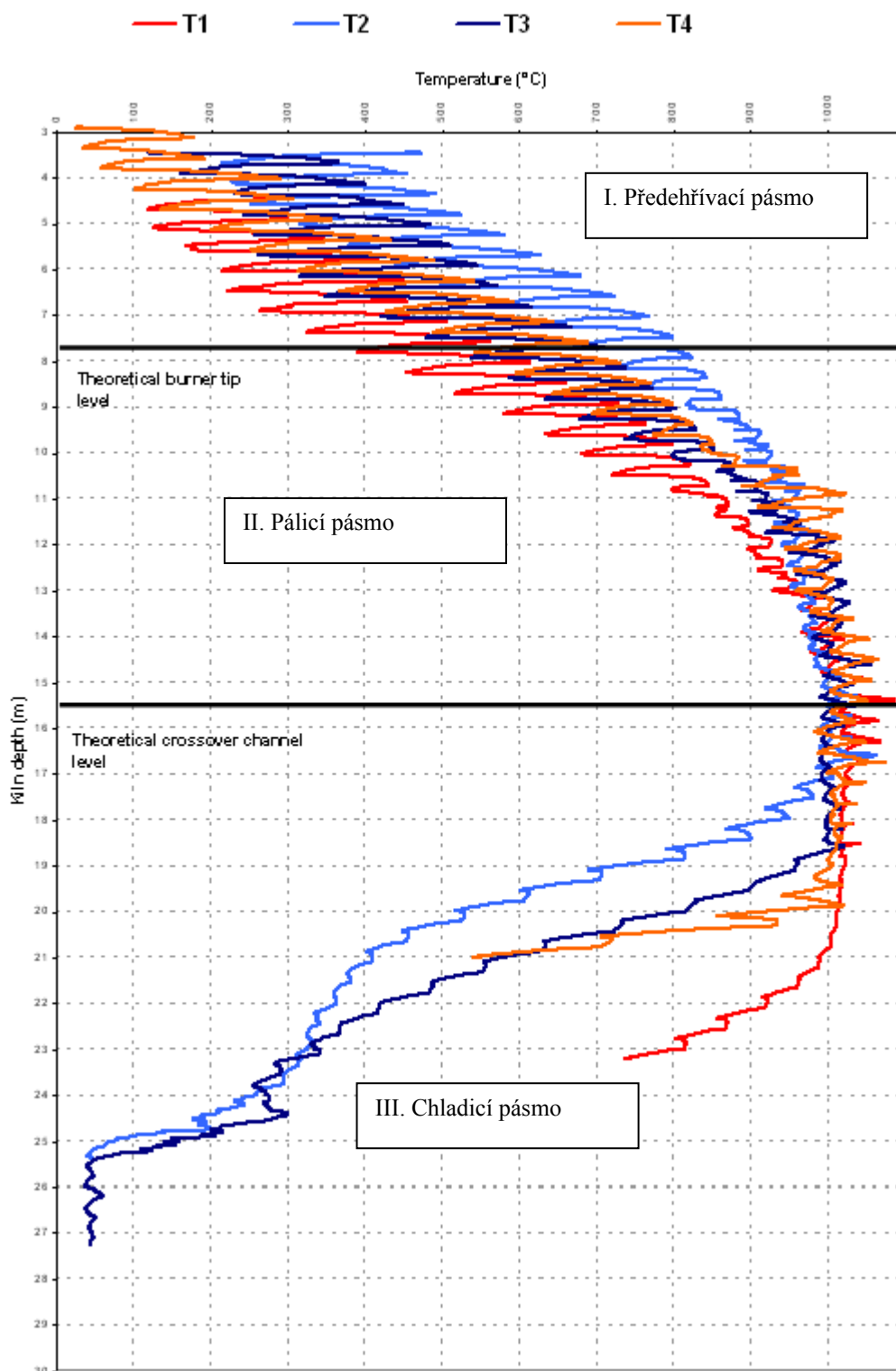
3.6 Vyhodnocení výsledků měření

K zpracování údajů měření se používá SW Microsoft Excel verze 2003 viz *Obrázek č. 3.10 Tabulka záznamu dat z teplotního záznamníku Testo*.

Microsoft Excel - DATA.xls											
Soubor Úpravy Zobrazit Vložit Formát Nástroje Data Okno Nápověda											
B42 2.12.2010											
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	Měření 100% NG - prosinec 2010										
2	zaokrouhlený průměr 100 cm/hod										
3	testo 177-T4 00760480	Datum	Čas	[°C] Channel 1	[m] Depth	[°C] Channel 2	[m] Depth	[°C] Channel 3	[m] Depth	[°C] Channel 4	[m] Depth
4	1	2.12.2010	14:56:02	262,3	4,43	448,8	3,43	118,1	3,43	24,7	2,43
5	2	2.12.2010	14:56:12	264,2	4,44	450,4	3,44	116,9	3,44	24,4	2,44
6	3	2.12.2010	14:56:22	266,1	4,44	451,9	3,44	118	3,44	24	2,44
7	4	2.12.2010	14:56:32	267,8	4,44	453,5	3,44	119,4	3,44	24	2,44
8	5	2.12.2010	14:56:42	268,5	4,44	456,5	3,44	120,4	3,44	24	2,44
9	6	2.12.2010	14:56:52	268,8	4,45	459,5	3,45	120,7	3,45	23,8	2,45
10	7	2.12.2010	14:57:02	269,3	4,45	462	3,45	121	3,45	23,7	2,45
11	8	2.12.2010	14:57:12	290,3	4,45	464,2	3,45	121,2	3,45	23,6	2,45
12	9	2.12.2010	14:57:22	291,3	4,46	466,1	3,46	121,2	3,46	23,4	2,46
13	10	2.12.2010	14:57:32	292,4	4,46	467,9	3,46	121,2	3,46	23,4	2,46
14	11	2.12.2010	14:57:42	293,5	4,46	469,6	3,46	121	3,46	23,3	2,46
15	12	2.12.2010	14:57:52	294,8	4,46	471,1	3,46	120,7	3,46	23,2	2,46
16	13	2.12.2010	14:58:02	295,8	4,47	472,2	3,47	120,3	3,47	23,2	2,47
17	14	2.12.2010	14:58:12	296,6	4,47	472,7	3,47	120,2	3,47	23,2	2,47
18	15	2.12.2010	14:58:22	294,3	4,47	470,7	3,47	123	3,47	23,3	2,47
19	16	2.12.2010	14:58:32	289,9	4,48	466,6	3,48	125,1	3,48	23	2,48
20	17	2.12.2010	14:58:42	285,1	4,48	458,6	3,48	133	3,48	23,8	2,48
21	18	2.12.2010	14:58:52	274,8	4,48	439,4	3,48	152,4	3,48	26,9	2,48
22	19	2.12.2010	14:59:02	264,7	4,48	422,3	3,48	171	3,48	31	2,48
23	20	2.12.2010	14:59:12	254	4,49	405,4	3,49	185,7	3,49	35,2	2,49
24	21	2.12.2010	14:59:22	243,4	4,49	389,2	3,49	198,6	3,49	39,2	2,49
25	22	2.12.2010	14:59:32	234	4,49	376,4	3,49	209,2	3,49	42,7	2,49
26	23	2.12.2010	14:59:42	225,8	4,49	366	3,49	218,4	3,49	45,7	2,49
27	24	2.12.2010	14:59:52	219,3	4,50	357	3,50	225,8	3,50	48,5	2,50
28	25	2.12.2010	15:00:02	213,4	4,50	349,2	3,5	232	3,5	50,8	2,5
29	26	2.12.2010	15:00:12	208,6	4,50	342,2	3,50	237,7	3,50	53,4	2,50
30	27	2.12.2010	15:00:22	204,7	4,51	336,1	3,51	242,4	3,51	56,1	2,51
31	28	2.12.2010	15:00:32	201	4,51	330,5	3,51	247	3,51	58,6	2,51
32	29	2.12.2010	15:00:42	198,2	4,51	325,5	3,51	251,1	3,51	60,9	2,51
33	30	2.12.2010	15:00:52	194,8	4,51	320,8	3,51	254,8	3,51	63	2,51
34	31	2.12.2010	15:01:02	191,2	4,52	316,4	3,52	258,3	3,52	64,8	2,52
35	32	2.12.2010	15:01:12	187,3	4,52	311,9	3,52	261,3	3,52	66,4	2,52
36	33	2.12.2010	15:01:22	183,4	4,52	307,7	3,52	264,5	3,52	68,5	2,52
37	34	2.12.2010	15:01:32	180,3	4,53	304,2	3,53	267,5	3,53	67,5	2,53
38	35	2.12.2010	15:01:42	177,4	4,53	301,2	3,53	270,2	3,53	66	2,53
39	36	2.12.2010	15:01:52	174,9	4,53	298,5	3,53	273,1	3,53	66	2,53
40	37	2.12.2010	15:02:02	172,7	4,53	296,2	3,53	276,2	3,53	66,5	2,53

Obrázek č. 3.10 Tabulka záznamu dat z teplotního záznamníku Testo

Celkem bylo zpracováno kolem 35 000 údajů. Daná data byla pro lepší přehlednost přenesena do grafů (závislost teploty na délce vnoření sondy do pece) viz *Obrázek č. 3.11*.



Obrázek č. 3.11 Souhrnný graf záznamů teploty termočlánků T1, T2, T3, T4

Na *Obrázku č. 3.11 Souhrnný graf záznamů teploty termočlánků T1, T2, T3, T4* je zaneseno grafické znázornění závislosti hloubky vápenné pece Mearz na teplotě na jednotlivých termočláncích T1, T2, T3, T4. Graf byl pro názornost rozdělen do výše popisovaných pásem (I. předehřivací, II. pálicí, III. chladicí).

V předehřivacím pásmu bylo dosahováno na všech termočláncích vzrůstajících teplot od 35 do 800 °C od 3 do 7,8 m hloubky pece. V pálicím pásmu bylo dosaženo kalcinační teploty 800 až 1050 °C v hloubce 7,8 až 15,5 m. V chladicím pásmu došlo postupně k zchlazení vsázky z 1050 na 30 °C. Termočlánky T1 a T4 byly bohužel zničeny (T4 v hloubce 21 m a T1 v hloubce cca 23 m).

Výsledky měření slouží k identifikaci teplotního profilu pece. Na jejich základě dochází k nastavování parametrů pece Maerz (množství vzduchu, paliva, atd.) pro danou kvalitu výrobků. Dále jsou výsledky použity k porovnávání teplotních profilů při přechodu na různé druhy paliv, tzv. fuel flexibility, nebo k porovnávání mezi podobnými typy vápenných pecí.

4 Závěr

Určení a měření teploty je pro lidstvo velmi důležité, jak v pracovním, tak mimopracovním procesu. Postupným zdokonalováním teplotních měřidel se zvyšuje spolehlivost měření, dokážeme pracovat s teplem a využít ho například k nepřerušení různých výrobních procesů zautomatizováním, čímž je možné minimalizovat výrobní ztráty způsobené při přerušování produkce.

Metodou měření dokážeme kontrolovat, diagnostikovat, regulovat a vyhodnotit stav tělesa a zjistit jeho závady. Znalost tepla a tepelné úpravy je také velmi podstatná pro úpravy surovin, kdy materiál, který byl zahříván či ochlazován, může změnit hmotnost nebo spotřebovávání tepelné energie v materiálu.

Obecně lze říct, že teplota je charakteristika tepelného stavu, kterou člověk dokáže vnímat, rozlišovat, přiřazovat a použít.

Použitá literatura

- [1] TŮMOVÁ, Olga. *Metrologie a hodnocení procesů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-249-7.
- [2] CSN 01 0115. *Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii*.
- [3] TNI 01 0115:2009. *Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny*.
- [4] ŠINDELÁŘ, Václav a Zdeněk TŮMA. *Metrologie, její vývoj a současnost*. Praha: ČMS, 2002.
- [5] *Techniques for approximating the International Temperature Scale of 1990*. 1990.
- [6] BERAN, Vlastimil a Olga TŮMOVÁ. *Měření veličin životního a pracovního prostředí*. Plzeň: ZČU, 1996.
- [7] časopisy *Metrologie, vědecká legální, praktická*. Úřad pro normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví ve spolupráci s Českým metrologickým institutem.
- [8] *EURAMET* [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://www.euramet.org>
- [9] *Ministerstvo obchodu a průmyslu* [online]. [cit. 2012-05-04]. Dostupné z: <http://www.mpo.cz>
- [10] *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví* [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.unmz.cz>
- [11] *Český metrologický institut* [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.cmi.cz>
- [12] *Český institut pro akreditaci* [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.cai.cz>
- [13] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006. ISBN 80-214-1868-0.
- [14] Trojný bod, fázový diagram. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Fazovy_diagram_priklad.svg
- [15] Trojný bod vody. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Voda_fazovy_diagram.jpg
- [16] ŠAPOŠNIKOV, V. *Nauka o teple*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [17] CSN ISO 31-4. *Veličiny a jednotky: Část 4: Teplo*.
- [18] *Interní dokumentace k řízení a údržbě vápenné pece Maerz*. Tmaň, 2010.
- [19] TESTO S.R.O. *Manuál k měřidlu Testo 177-T*. Praha, 2010.

