



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO**  
**INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

# **VYUŽITÍ SPALIN PLYNOVÉ MIKROTURBÍNY PRO SUŠENÍ**

USE OF FLUE GAS FROM GAS MICROTURBINE FOR DIRECT DRYING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**BC. JOSEF TĚTHAL**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. PAVEL KUBA**

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství  
Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Josef Těthal

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

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

### **Využití spalin plynové mikroturbíny pro sušení**

v anglickém jazyce:

#### **Use of flue gas from gas microturbine for direct drying**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá problematikou přímého sušení vlhkých materiálů pomocí spalin plynové mikroturbíny. Výstupem je model procesu sušení sestavený na základě obecných fyzikálních vztahů. Model bude sestaven jako statický (analytický) a pro konkrétní sušený materiál i dynamický.

Plynová mikroturbína je součástí vybavení Laboratoře energeticky náročných procesů, NETME Centre. Výsledky práce by měly podpořit širší uplatnění plynových mikroturbín v průmyslové praxi.

Cíle diplomové práce:

Seznámení se s teorií přímého sušení a kogenerací pomocí plynových mikroturbín.  
Sestavení matematického modelu procesu sušení na základě platných fyzikálních vztahů.  
Ověření parametrů modelu podle výsledků případové studie.

Seznam odborné literatury:

TSOTSAS, Evangelos a A MUJUMDAR. Modern drying technology. Weinheim: Wiley-VCH, 2007, xxxvii, 320 s. ISBN 978-3-527-31556-71.

SOARES, Claire. Microturbines. Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2007, xxix, 271 p. ISBN 07-506-8469-0.

ŠUROVSKÝ, Jan. Spalovací turbíny, Praha, 2013, 245 s. ISBN: 978-80-260-4106-1.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Kuba

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 26.11.2014

L.S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
Ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce pojednává o řešení problematiky spalin z plynové mikroturbíny jako sušícího média pro obecné sušení. Aby bylo možné tyto spaliny použít je nutné je ochladit na požadovanou teplotu. Výpočtová část zahrnuje právě řešení těchto uzlů. Další úsek obsahuje bilanční řešení obecné sušárny pro dořešení výstupních parametrů vlhkého sušícího média. Na závěr je popsána problematika sušení v prádelenském procesu a využití spalin pro sušení na konkrétním zařízení, kterým je sušička prádla Primus T24 G.

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Sušení, přímé sušení, spaliny, zemní plyn, vlhký vzduch, plynová mikroturbína.

## **ABSTRACT**

This master's thesis deals with the problematic of flue gas produced by a gas microturbine which is used as a drying media for general drying. Flue gas needs to be cooled to specific temperatures. The computing part of this work includes solving the microturbine and the mixer. Further part contains balance solution of a general dryer for resolving the output parameters of wet flue gas. In the last part, the problematic of drying in a laundry facility is described, along with using the flue gas for drying at the specific clothes dryer Primus T24 G.

## **KEYWORDS:**

Drying, direct drying, flue gas, natural gas, humid air, gas microturbine.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE TÉTO PRÁCE**

TĚTHAL, J. *Využití spalín plynové mikroturbíny pro sušení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Kuba.

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s využitím uvedených zdrojů, dále jsem vycházel z doporučené literatury a odborných konzultací.

V Brně dne 29. května 2015

.....  
Bc. Josef Těthal

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu této diplomové práce Ing. Pavlovi Kubovi za spolupráci, trpělivost, odborné vedení a časovou flexibilitu během jejího řešení. Dále poděkování patří doc. Ing. Ladislavu Bébarovi, CSc. a Ing. Miloslavu Dohnalovi za konzultace a cenné připomínky. Na závěr náleží poděkování rodičům za morální a finanční podporu při studiu.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE .....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>TEORIE SUŠENÍ .....</b>	<b>13</b>
3.1	Rozdělení způsobů sušení .....	13
3.2	Sušení vypařováním a odpařováním .....	13
3.3	Vlhkost .....	14
3.3.1	Vyjádření množství vody obsažené v sušeném materiálu .....	14
3.3.2	Vyjádření množství vody obsažené v sušicím médiu .....	14
3.3.3	Rovnovážný diagram vlhkosti .....	14
3.3.4	Měření vlhkosti .....	15
3.4	Vlastnosti sušených materiálů .....	16
3.5	Vnější a vnitřní difuze .....	17
3.6	Fázová rovnováha při sušení .....	17
3.7	Statika sušení .....	18
3.7.1	Hmotnostní bilance teoretické sušárny .....	18
3.7.2	Tepelná bilance teoretické sušárny .....	18
3.7.3	Sloučení hmotnostní a tepelné bilance sušárny .....	19
3.8	Kinetika sušení .....	19
3.8.1	Počáteční období .....	19
3.8.2	Období konstantního vysoušení .....	20
3.8.3	Období klesající rychlosti vysoušení .....	20
3.9	Rozdělení sušáren .....	20
3.9.1	Konvektivní sušárny .....	21
3.9.2	Kontaktní sušárny .....	25
3.9.3	Radiační sušárny .....	26
3.9.4	Ostatní příklady sušáren .....	27
<b>4</b>	<b>PLYNOVÁ MIKROTURBÍNA .....</b>	<b>28</b>
4.1	Paliva pro spalovací mikroturbíny .....	28
4.2	Rozdělení mikroturbín na základě směru proudění .....	28
4.3	Popis funkce radiální mikroturbíny .....	28
4.4	Hlavní části mikroturbín .....	28
4.5	Současná výroba tepla a elektrické energie: kogenerace .....	29
4.6	Využití kogeneračních jednotek .....	30
4.7	Plynová mikroturbína Capstone C30 .....	31
4.7.1	Emise mikroturbíny Capstone C30 .....	31



<b>5</b>	<b>SUŠÍCÍ MÉDIUM – SPALINY .....</b>	<b>33</b>
5.1	Kontaminace potravin.....	33
5.1.1	Polycyklické aromatické uhlovodíky .....	34
5.1.2	Závěrem ke kontaminaci .....	34
5.2	Složení spalovaného plynu pro výpočet .....	34
5.3	Parametry z experimentu .....	36
5.3.1	Spotřeba zemního plynu při výkonu 25 kW .....	36
5.3.2	Teplota spalin .....	37
5.3.3	Přebytek kyslíku v suchých spalinách.....	37
5.4	Spalovací vzduch .....	37
5.4.1	Vstupní hodnoty vzduchu.....	38
5.4.2	Výpočet složení vlhkého spalovacího vzduchu.....	38
5.5	Spalování zemního plynu.....	39
5.5.1	Stechiometrické výpočty .....	40
5.6	Spotřeba spalovacího vzduchu při přebytku kyslíku v suchých spalinách.....	41
5.7	Ochlazení spalin na požadovanou teplotu.....	44
5.7.1	Výpočty středního měrného teplo.....	45
5.7.2	Výpočet molárního toku chladícího vzduchu.....	46
5.8	Shrnutí parametrů sušícího média.....	48
<b>6</b>	<b>SUŠENÍ V PRÁDELENSKÉM PROCESU .....</b>	<b>49</b>
6.1	Sušičky v domácnostech.....	49
6.2	Druhy vlhkostí v prádle .....	50
6.3	Sušička Primus T24 G .....	50
6.4	Kinetika sušení v bubnové sušičce .....	52
6.4.1	Přenos tepla .....	52
6.4.2	Přenos hmoty .....	53
6.5	Sloučení modelu a experimentu.....	55
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....</b>	<b>58</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>61</b>
<b>10</b>	<b>PŘÍLOHA.....</b>	<b>64</b>

# 1 ÚVOD

Každý laik si pod pojmem „sušení“ představí sušení ovoce, zeleniny, bylin či prádla na prádelní šňůře. Tento proces často v domácnostech probíhá přirozeně, bez využití jakýchkoliv energetických zařízení. Jedná se tedy o sušení bez nuceného dodávání energií – je levné, avšak časově náročné a navíc s tak trochu „nejistým“ výsledkem, který závisí na okolním proměnném prostředí.

S postupem času a s rostoucími nároky obyvatelstva se rozvinul i proces sušení, který dnes probíhá snad ve všech odvětvích, mezi které patří např. potravinářský, chemický, dřevozpracující průmysl a další. Ve všech těchto průmyslech sušení probíhá ve velkých kapacitách, a proto se zde klade velký důraz na ekonomickou bilanci, rychlost sušení, kvantitu nasušeného materiálu, jeho kvalitu a ekologii. Proces sušení v průmyslové sféře znamená velké množství spotřebované energie. Proto mezi další důležité parametry patří také vhodná volba technologie – jak sušicího zařízení, tak metody ohřevu sušicího média, kde každá úspora vede i k úspoře finanční. Trendy dnešní doby směřují k využívání každého odpadního tepla, byť se jedná o teplo s nízkým potenciálem. V kombinaci s technologiemi snižujícími tepelné ztráty se zvyšuje celková účinnost zařízení. To platí rovněž pro sušárny, na které se i v rámci konkurence zvyšují nároky.

Jako sušicím médiem v této práci jsou využity spaliny z plynové mikroturbíny. Mikroturbíny se v dnešní době rozrůstají a nalézají čím dál více možností uplatnění. Mají spousty výhod – od vyšších účinností až například po nízké nároky na údržbu. A samozřejmě i některé nevýhody, mezi které patří vysoké pořizovací náklady. Tato nevýhoda jejich rozvoj zatím přibrzdňuje, avšak co bude například za deset let lze těžko odhadovat.

Spojení procesu sušení a sušicího média jako spalin z plynové mikroturbíny dává dohromady zajímavou kombinaci, která v současné době příliš rozšířená není a nabízí nové možnosti pro zkoumání, což je námětem této práce.

## 2 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Zadání této diplomové práce je částečně obecné, proto je nebytné jej upřesnit a stanovit si cíle. Na Obr. 1 je zobrazeno schéma, které znázorňuje toky jednotlivých proudů (zemní plyn, spalovací vzduch, spaliny, chladicí vzduch a sušící médium) a hlavní uzly (plynová mikroturbína, směšovač, sušička). Generovaná elektrická energie není uvažována. Dále jsou popsány jednotlivé bloky.

### BLOK 1

Teoretická část:

- teorie sušení
- plynové mikroturbíny
- spaliny z plynové mikroturbíny.

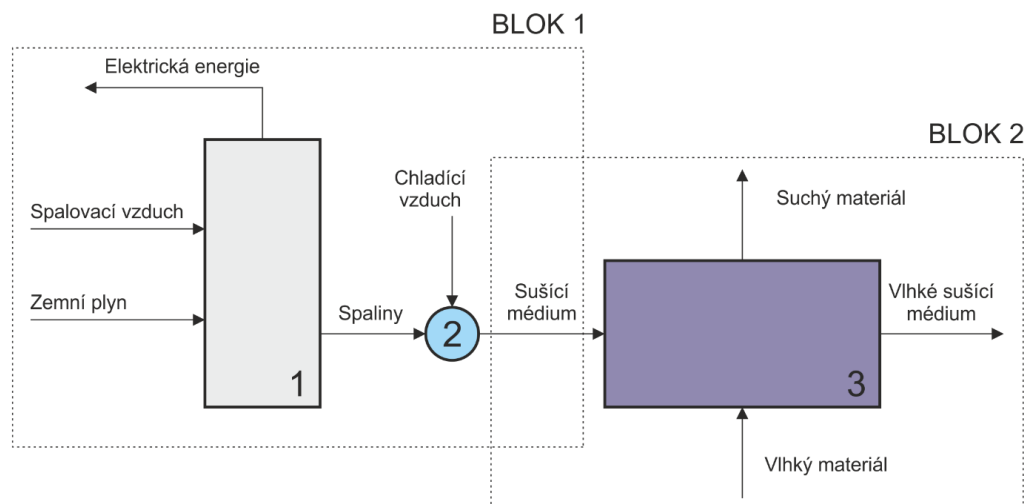
Výpočtová část zahrnuje:

- volba vstupních parametrů
- stechiometrické spalování zemního plynu v plynové mikroturbíně
- bilance směšovače (ochlazení spaliny na požadovanou teplotu)
- výpočet konečných parametrů sušícího média pro obecné sušení
- bilanční (statický) model teoretické sušárny.

### BLOK 2

Teoretická část:

- aplikace sušení v oblasti prádelnictví
- sušárna Primus T24 G
- kinetický (dynamický) model sušárny.



Obr. 1 Schéma jednotlivých proudů

Do plynové mikroturbíny (1) vstupuje zemní plyn a spalovací vzduch. Tato mikroturbína pracuje jako kogenerační zařízení, tzn., že vyrábí elektrickou energii a teplo v podobě spalin.

Cílem této práce je využití těchto spalin pro sušení v obecném slova smyslu. Jelikož se jedná o plyn, který obsahuje i nežádoucí látky, je nezbytné také zohlednit možné riziko při sušení potravinářských výrobků.

Jedním z hlavních parametrů při sušení je teplota sušícího média. Ta musí být optimálně zvolena pro každý konkrétní materiál zvlášť. Pokud tomu tak není, může dojít vlivem vyšších teplot k nežádoucím deformacím materiálu nebo k jeho úplnému znehodnocení (potravinářské výrobky apod.). Proto je nezbytné spaliny ochladit na požadovanou teplotu. Pro ochlazení spalin je použit opět vzduch, který se směšuje ve směšovači (2) beze ztrát se spalinami. Výstupem prvního bloku je tedy výpočet složení, entalpie, vlhkosti, množství sušícího média s ohledem na požadovanou teplotu.

Po ochlazení vstupuje sušící médium do sušárny (3). V prvním případně se jedná o sušárnu obecnou (vyřešena v kapitole o teorii sušení), pro niž lze použít vypočtené parametry sušícího média – jedná se o bilanční model. Kinetický model popsany podle p. Deanse vyžaduje už konkrétní aplikaci sušárny. Pro případ práce je využita sušička prádla Primus T24 G umístěná v laboratoři NETME.

## 3 TEORIE SUŠENÍ

Pojem sušení znamená obecně odstraňování vlhkosti v podobě vody z tuhých látek. Avšak nemusí jít jen o odstraňování vlhkosti z pevných materiálů, lze též odstraňovat vlhkost z ostatních skupenství (z plynů a kapalin). V případě plynů se může například jednat o sušení zemního plynu a v případě kapalin se dá uvést jako příklad odhánění vody z organických kapalin proudem horkého plynu. Samotnou vlhkost tvoří nejčastěji voda a sušící médium je obvykle vzduch. Tato práce je zaměřena právě na tuhé materiály, jako sušící médium jsou upřednostněny spaliny z plynové mikroturbíny. Není-li uvedeno jinak, je v kapitole 3 až po kapitole 3.9, která se týká jednotlivých typů sušáren, čerpáno ze zdrojů [1], [2], [3], [4] a [5].

Tuhé materiály mají velmi rozdílné struktury a povahy, proto je důležité zvolit správný způsob sušení. Důvody této volby jsou zřejmé – při sušení dochází ke změně struktury materiálu (scvrkávání, rozpraskání) nebo vlivem teploty může dojít ke znehodnocení materiálu (potravinářské výrobky). Dále může také nastat změna ve složení sušené látky, např. uniknutím krystalické vody.

### 3.1 Rozdělení způsobů sušení

Nejčastějším důvodem sušení je snížení hmotnosti a objemu sušeného materiálu, změna vlastností, jako např. zvýšení pevnosti, konzervace potravin, zvýšení výhřevnosti paliva. Zařízení pro sušení se nazývají sušárny a princip sušení lze rozdělit podle různých kritérií:

- dle metody sušení (přímé a nepřímé sušení)
- dle sušícího média (vzduch, spaliny, inerty, vakuum)
- dle přívodu tepla (konvekce, kondukce, radiace)
- dle charakteru proudění sušícího média (fluidní lože, proudové aj.)
- dle pohybu sušeného materiálu (v klidu, mechanické či pneumatické přesouvání aj.)
- dle provozu (kontinuální, diskontinuální).

Proces, který v sušárnách probíhá je současné sdílení tepla a hmoty. Sušící plyn předává teplo sušenému materiálu konvekci a dále přechází do sušeného materiálu teplo ze stěn sušárny sáláním a vedením. Díky dodávce tepla je ze sušeného materiálu odváděna vlhkost do sušícího média a následně pokračuje mimo prostor sušárny.

### 3.2 Sušení vypařováním a odpařováním

#### Sušení vypařováním

Nejobecnější způsob odstraňování vody je vypařování. Vlhkost se odstraňuje proudem suchého plynu, který je v ideálním případě nenasycený vlhkostí. Sušící médium je zároveň nositelem tepla a postupně se vypařovanou látkou nasycuje, přičemž teplota sušeného materiálu je nižší než teplota varu vypařované kapaliny. Vypařování lze rozdělit na přirozené a umělé. Přirozené sušení probíhá samovolně, bez přívodu tepla nebo bez umělé cirkulace vzduchu. Rychlost přirozeného vypařování nelze regulovat ani dosáhnout libovolně malé (konečné) vlhkosti sušeného materiálu. Proto se v průmyslu upřednostňuje umělé sušení, které je možné regulovat a dosáhnout tak požadovaných výsledků.

## Sušení odpařováním

Odpařováním se vlhkost odstraňuje tak, že se sušený materiál zahřeje nad jeho teplotu bodu varu. Vlhkost je odváděna ve formě sytých par.

### 3.3 Vlhkost

Vlhkost patří mezi základní veličiny v procesu sušení, je nežádoucí a snahou sušení je její minimalizování.

#### 3.3.1 Vyjádření množství vody obsažené v sušeném materiálu

Měrná vlhkost

$$X_M = \frac{\text{hmotnost vody v materiálu [kg]}}{\text{hmotnost suchého materiálu [kg]}} [-] \quad (3.1)$$

#### 3.3.2 Vyjádření množství vody obsažené v sušícím médiu

Absolutní vlhkost

$$Y_{SM} = \frac{\text{hmotnost vody v sušícím médiu [kg]}}{\text{hmotnost suchého sušícího média [kg]}} [-] \quad (3.2)$$

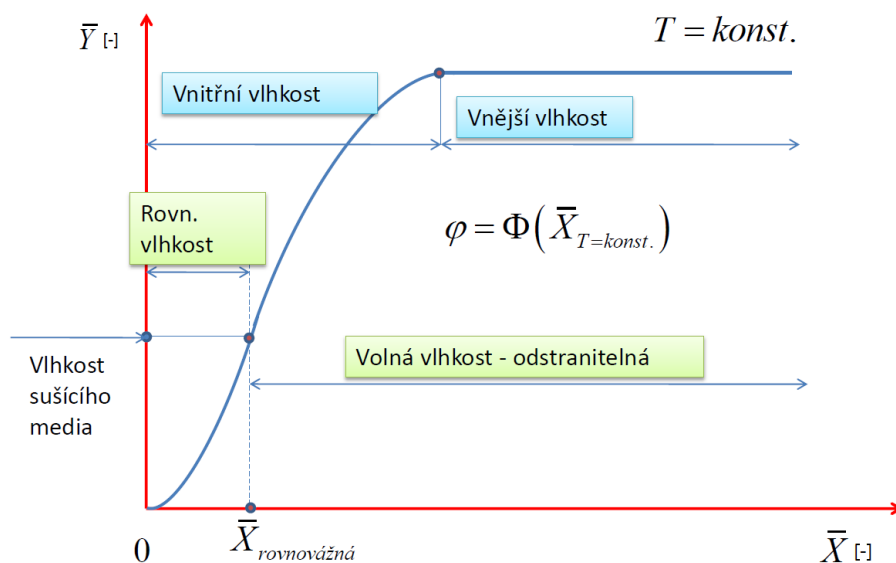
Relativní vlhkost

$$\varphi_{SM} = \frac{\text{parciální tlak vody v sušícím médiu [kPa]}}{\text{tlak nasycených par [kPa]}} [-] \quad (3.3)$$

Zmíněné vlhkosti se nevztahují na všechnu vodu, ale jen na tu, kterou je možné technologicky odstranit tak, aby nedošlo např. k degradaci materiálu.

#### 3.3.3 Rovnovážný diagram vlhkosti

Druhy vlhkostí, které se mohou vyskytovat v materiálu, jsou na Obr. 2. Křivka v diagramu znázorňuje obecný příklad rovnováhy mezi sušícím médiem a sušeným materiálem.



Obr. 2 Rovnovážný diagram vlhkosti [6]

### **Vnější vlhkost (nevázaná)**

Vlhkost je vázaná k povrchu materiálu hlavně přilnavostí a vykazuje napětí par rovné tenzi páry při dané teplotě. Převod z kapalně do plynné fáze je obdobný jako při vypařování vody z volné hladiny.

### **Vnitřní vlhkost (vázaná)**

Tato vlhkost je vázána v nitru materiálu pomocí kapilárních sil.

### **Rovnovážná vlhkost**

Představuje množství vlhkosti, které je v rovnováze s parciální tenzí páry v plynném prostředí (sušícím médiem).

### **Volná vlhkost**

Vlhkost, kterou lze odstranit pomocí sušení.

#### **3.3.4 Měření vlhkosti**

Vlhkost je možné určit pomocí výpočtu nebo pomocí měření. Tento úsek je věnován právě metodě měření, která se dá rozdělit na několik základních metod.

#### **Metoda hygrometrická (absorpční metoda)**

U této metody jsou využity vhodné tuhé materiály, které vlivem absorpční vlhkosti mění svůj elektrický odpor, dielektrické vlastnosti, délku aj. Metoda je jednoduchá a zároveň citlivá. Využívá fyzikální a chemické změny vlastností materiálů, ke kterým dochází při změně vlhkosti. Jedním z nejstarších materiálů používaných u této metody je lidský vlas. Jako další používané materiály lze uvést směsi polymerů, roztoky hygroskopických solí nanesených na pórovitých podložkách, případně jiné anorganické sloučeniny. Na senzory absorpčního typu jsou kladeny tyto požadavky:

- absorpce a desorpce musí probíhat rychle s minimální hysterezí
- kalibrační křivky by měly být stálé
- změna měřené veličiny musí být dostatečně velká
- měření v širokém teplotním rozmezí.

Pomocí hygrometrické metody měří dilatační, kapacitní, odporové, rezonanční vlhkoměry a vlhkoměry s vyhříváním termistory.

#### **Metoda psychrometrická**

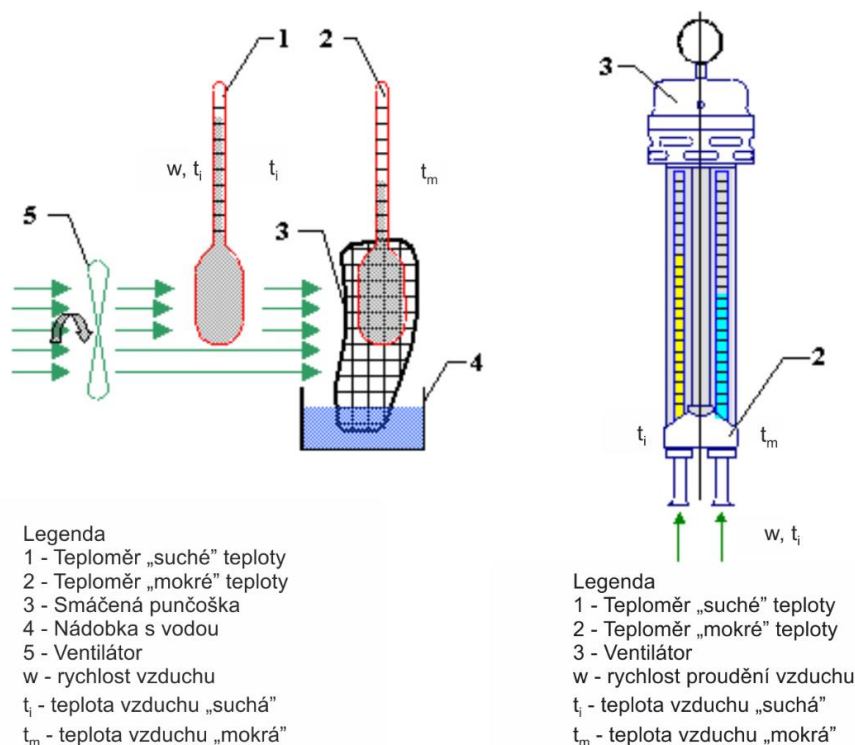
Pomocí této metody pracují psychrometry. Při adiabatickém sycení sušícího média vodní párou jsou měřeny dvě teploty (teplota suchého a mokrého teploměru). Následně pak z psychrometrického rozdílu lze stanovit relativní vlhkost. Psychrometry jsou dvojího typu.

#### Stabilní psychrometry

Bez nucené cirkulace měřeného plynu. Jsou také známy pod názvem Assmanův psychrometr. Chyba měření relativní vlhkosti se pohybuje kolem  $\pm 20\%$ .

## Aspirační psychrometry

Nucená a konstantní cirkulace plynu je zajištěna pomocí umělého větrání, přičemž rychlost proudícího plynu musí být větší než  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Při použití rtuťových teploměrů lze dosáhnout přesnosti  $\pm 2 \%$  relativní vlhkosti, při relativní vlhkosti měřeného plynu kolem 50 %.



Obr. 3 Aspirační psychrometr [7]

## Gravimetrická metoda

Metoda patří mezi nejpresnější, je založena na principu vážení vhodného materiálu (sušidla) před a po vysušení. Jako sušidlo se nejčastěji používá peroxid fosforu. Metoda je časově náročná a vhodná pouze pro laboratorní podmínky, proto se používá převážně pro kalibraci a testování jiných zařízení.

Jako další metody měření vlhkosti plynů lze uvést metodu měření rosného bodu, difuzní metodu, měření tepelné vodivosti, spektrální metody, kondenzační metody aj.

## 3.4 Vlastnosti sušených materiálů

Látky připadající v úvahu pro sušení mají dvě různé struktury.

### Koloidní struktury

Jsou pružné a mění během sušení své rozměry. Po následném vysušení si zachovávají původní pružnost. Jedná se například o želatinu, celulozid apod.

### Kapilární struktury

Jsou pórovité a během sušení se rozpadají až na prášek (keramické výrobky).

Na rozhraní výše zmíněných typů jsou látky kapilárně-koloidní, kombinují i jejich vlastnosti.



### 3.5 Vnější a vnitřní difuze

#### Vnější difuze

Při vnější difuzi dochází k odvádění vlhkosti z povrchu materiálu na základě dodání energie do materiálu. Proces je závislý na okolních podmínkách (vlhkost, teplota, tlak, rychlost a směr proudění) a na velikosti povrchu.

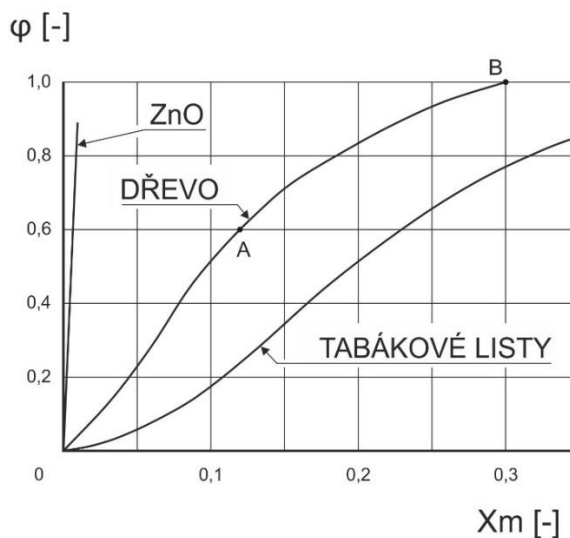
#### Vnitřní difuze

Pokud je z povrchu odvedena vlhkost do sušícího média, tak dochází k nerovnováze rozložení vlhkosti v objemu sušeného materiálu. V tomto okamžiku se vytvoří gradient vlhkosti a dochází tak k toku vlhkosti směrem k povrchu sušeného materiálu. Vnitřní difuze je závislá převážně na teplotě, množství vlhkosti a na fyzikálních vlastnostech materiálu.

Díky tomuto nucenému pohybu vlhkosti (od vnitřní části na povrch materiálu) a na základě „snahy“ materiálu mít v celém objemu stejnou vlhkost dochází k sušení. Tento nucený pohyb vlhkosti je způsoben dodáváním tepla do materiálu a současně odvodem vlhkosti z jeho materiálu.

### 3.6 Fázová rovnováha při sušení

Rovnováha mezi sušeným materiálem a sušícím plynem je možné zobrazit graficky. Jde o experimentálně zjištěná data, která ukazují závislost mezi rovnovážnou vlhkostí materiálu a parciálním tlakem vlhkosti v sušícím médiu. Na Obr. 4 je na svislé ose relativní vlhkost vzduchu a na vodorovné ose vlhkost materiálu v kg vody na kg suchého materiálu při teplotě 25 °C.



Obr. 4 Fázová rovnováha některých vzorků

Pro ukázkou jsou zde porovnány tři různé materiály (dřevo, tabákové listy a oxid zinečnatý). Pokud by se např. vzduch o relativní vlhkosti  $\varphi = 0,6$  stýkal se dřevem o  $X_m = 0,3$ , tak by docházelo k sušení vypařováním až do okamžiku dosažení bodu A, tj. rovnovážná vlhkost při relativní vlhkosti vzduchu 0,6. Při delším styku stejného vzduchu, se vlhkost obsažená ve dřevě už nebude měnit. Pokud by došlo ke snižování vlhkosti vzduchu, bude se snižovat i vlhkost dřeva po rovnovážné křivce. Absolutně suchého dřeva lze tedy dosáhnout jen stykem s absolutně suchým vzduchem.

Pokud by se dřevo dostalo do kontaktu s nasyceným vzduchem, tak může mít libovolnou vlhkost větší než  $X_m = 0,3$ . Vlhkost, která je rozdílem mezi vlhkostí dřeva a vlhkostí v bodě B je nazývána jako nevázaná vlhkost.

Z obrázku je rovněž zřejmé, že křivky rovnovážných vlhkostí se významně liší. Největší rozdíl je mezi organickými a anorganickými látkami. Anorganické látky nerozpustné ve vodě nemají adsorpční vlastnosti jako látky organické. Organické látky mají buněčnou strukturu a jejich schopnost předávat vlhkost je lepší.

### 3.7 Statika sušení

#### 3.7.1 Hmotnostní bilance teoretické sušárny

Materiálová bilance sušárny je závislá pouze na vstupních a výstupních parametrech. Hmotnostní tok suchého sušeného materiálu je konstantní, proto platí následující vztah.

$$\dot{m}_{s,M,in} = \dot{m}_{s,M,out} = \dot{m}_{s,M} \quad (3.4)$$

Taktéž hmotnostní průtok suchého sušícího média je konstantní.

$$\dot{m}_{s,SM,in} = \dot{m}_{s,SM,out} = \dot{m}_{s,SM} \quad (3.5)$$

Dále platí, že součet suchého materiálu a vody v něm obsažené je celkový hmotnostní průtok:

$$\dot{m}_{M,in} = \dot{m}_{s,M,in} + \dot{m}_{H_2O,M,in} \quad (3.6)$$

Totéž platí i pro výstup:

$$\dot{m}_{M,out} = \dot{m}_{s,M,out} + \dot{m}_{H_2O,M,out} \quad (3.7)$$

Hmotnost vody v materiálu na výstupu:

$$\dot{m}_{H_2O,M,out} = 0.$$

Celková hmotnostní bilance sušárny a následně po úpravě.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{s,M,in} + \dot{m}_{H_2O,M,in} + \dot{m}_{s,SM,in} \cdot (1 + Y_{SM,in}) \\ = \dot{m}_{s,M,out} + \dot{m}_{H_2O,M,out} + \dot{m}_{s,SM,out} \cdot (1 + Y_{SM,out}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\frac{\dot{m}_{s,SM}}{\dot{m}_{H_2O,M,in}} = \frac{1}{Y_{SM,out} - Y_{SM,in}} \quad (3.9)$$

#### 3.7.2 Tepelná bilance teoretické sušárny

Sušárna nemá žádné tepelné ztráty a není do ní dodáváno žádné přídavné teplo.

$$\dot{Q}_z = 0$$

$$\dot{Q}_p = 0$$

Celková tepelná bilance sušárny, následně po úpravě.

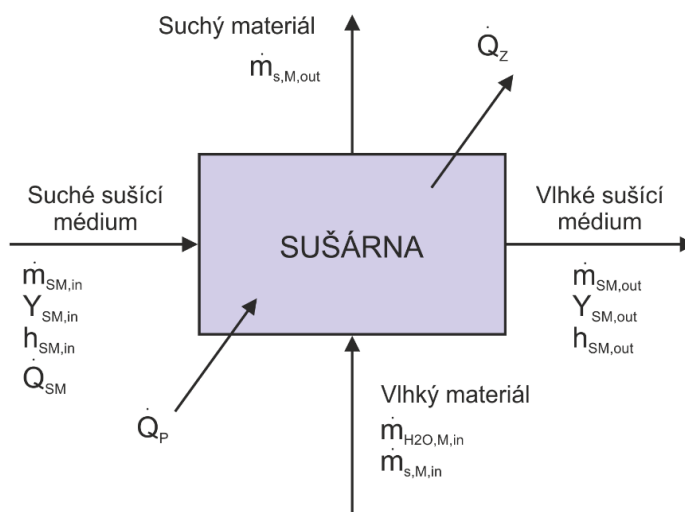
$$\begin{aligned} \dot{m}_{s,M,in} \cdot h_{s,M,in} + \dot{m}_{H_2O,M,in} \cdot h_{H_2O,M,in} + \dot{m}_{s,SM,in} \cdot h_{SM,in} + \dot{Q}_{SM} + \dot{Q}_P \\ = \dot{m}_{s,M,out} \cdot h_{s,M,out} + \dot{m}_{H_2O,M,out} \cdot h_{H_2O,M,out} \\ + \dot{m}_{s,SM,out} \cdot h_{SM,out} + \dot{Q}_Z \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\frac{\dot{Q}_{SM}}{\dot{m}_{s,SM}} = h_{SM,out} - h_{SM,in} \quad (3.11)$$

### 3.7.3 Sloučení hmotnostní a tepelné bilance sušárny

$$\dot{Q}_{SM} = \dot{m}_{H_2O,M,in} \cdot \frac{h_{SM,out} - h_{SM,in}}{Y_{SM,out} - Y_{SM,in}} \quad (3.12)$$

Sloučením hmotnostní a tepelné bilance vznikne vztah, který říká, že potřebné teplo pro sušení závisí na rozdílu výstupní a vstupní entalpii a na rozdílu vlhkostí.



Obr. 5 Bilanční model teoretické sušárny

## 3.8 Kinetika sušení

Statická bilance sušárny udává pouze vstupní a výstupní parametry a jejich množství. Avšak nedává odpovědi na otázky, jak dlouho bude sušení probíhat nebo v jakém stavu se nachází sušený materiál v daném čase. Dále např. neřeší, jak má být dlouhá kontinuální pásová sušárna, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů apod.

### 3.8.1 Počáteční období

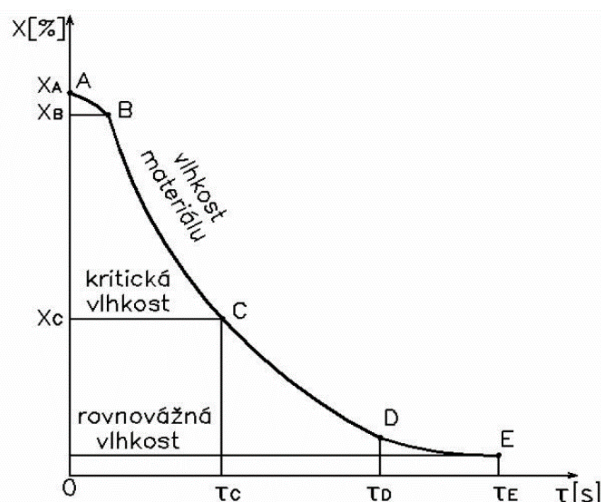
Tato fáze je zobrazena na Obr. 6 mezi body A a B. Fáze probíhá poměrně rychle při porovnání s celkovou dobou sušení. Sušený materiál se začíná zahřívat na teplotu mokrého teploměru a z povrchu materiálu se vypařuje voda. Toto vypařování má za následek zpomalení vysoušení. Často se stává, že tato fáze splývá s další fází a lze ji těžko rozeznat.

### 3.8.2 Období konstantního vysoušení

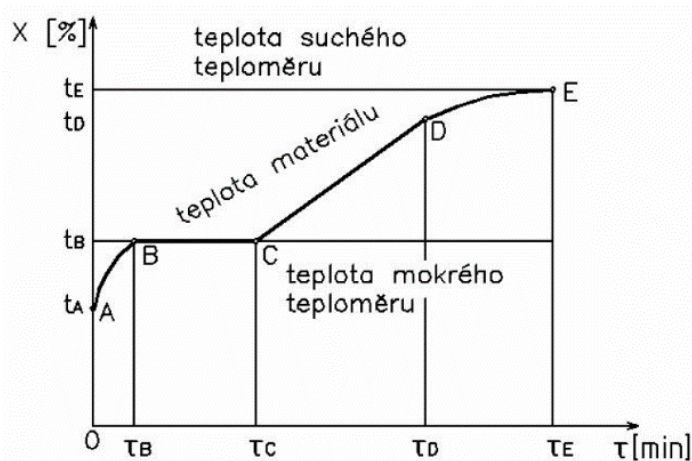
Po dosažení teploty mokrého teploměru dochází k hlavní části sušení. Teplota už nenarůstá a energie obsažená v sušicím médiu se spotřebovává pouze na sušení. Fáze probíhá mezi body B a C.

### 3.8.3 Období klesající rychlosti vysoušení

Materiál už je natolik vysušen, že voda nepokrývá celý jeho povrch a sušící médium se tak dostává do přímého styku s materiálem. Tím dochází ke snižování rychlosti vypařování a následně se tento materiál začne ohřívat. V závěrečné fázi teplota materiálu dosáhne teploty sušícího média a po dostatečně dlouhé době dojde i k vyrovnání jejich vlhkostí.



Obr. 6 Závislost měrné vlhkosti na době sušení [8]



Obr. 7 Závislost teploty materiálu na době sušení [8]

## 3.9 Rozdělení sušáren

Jelikož při procesu sušení vlivem přívodu energie dochází k přenosům tepla a hmoty, tak se sušárny rozdělují primárně dle způsobu dodávané energie a dále dle typu konstrukce či způsobu dopravy sušeného materiálu. V této podkapitole se nachází výběr některých typů sušáren a jejich stručná charakteristika. Je zde čerpáno ze zdrojů [1] a [9]. Popis těchto sušáren je

obecný, výrobci na základě svého know-how a zkušeností mohou mít různé konstrukční úpravy, jiné způsoby ohřevu sušícího média, recirkulaci sušícího média, případně různé kombinace vlastností jednotlivých sušáren.

### 3.9.1 Konvektivní sušárny

Přenos tepla i hmoty je zajištěn pomocí teplého média (nejčastěji horký vzduch, případně spaliny). Mohou pracovat při atmosférickém i velmi nízkém tlaku.

#### Komorová sušárna

Komorová (skříňová) sušárna patří mezi nejrozšířenější sušárny, jelikož jsou konstrukčně poměrně jednoduché. Skříň je vyrobena z ocelového plechu a pro snížení tepelných ztrát se vyrábí v dvouplášťovém izolovaném provedení. U těchto typů sušáren lze použít recirkulaci sušícího média. Sušárny mají malý odpařovací výkon (cca  $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ). Vhodné jsou převážně pro kusové látky (ovoce, zelenina, maso, bobuloviny atd.). Princip je založen na ofukování vrstvy, která může být nehybná (kusové materiály) nebo hybná (promíchávané sypké materiály). Nevýhodou těchto komorových sušáren je nerovnoměrné rozložení teploty (hlavně pro nehybnou vrstvu), při kterém může dojít k místnímu přehřátí sušeného materiálu a tím k jeho znehodnocení. Další nevýhodou je energeticky nákladný provoz.



Obr. 8 Komorová sušárna [10]

Po vložení vlhkého materiálu do sušícího prostoru je sušárna uzavřena dveřmi. Následně ventilátor začne nasávat okolní vzduch, který je přes topná tělesa ohříván. Ohřátý vzduch vstupuje do pracovního prostoru, kde odebírá vlhkost ze sušeného materiálu. Na závěr vychází vlhký vzduch pryč ze sušárny. Sušárna pracuje diskontinuálně a po ukončení sušení je nutné vysušený materiál vyjmout a vložit nový vlhký materiál. Jeden cyklus může trvat od jednotek a až po desítky hodin.

## Vozokomorová sušárna

Pracuje velmi podobně jako komorová sušárna, avšak periodicky. Sušení probíhá v komoře, do které je zaveden sušící materiál na vozíku, který je přiveden po kolejích. Tento typ sušáren může mít více zón, kde každá zóna pracuje v jiném režimu. Po ukončení procesu sušení v jedné zóně přejede vozík do další zóny a na jeho místo přijíždí nový vozík. Pohyb vozíku je zajištěn buď ručně anebo pomocí elektromotoru. Po výměně vozíků se zavírají dveře ze sušárny. Tento typ sušáren se využívá pro vytvrzování nebo tepelné zpracování některých kovů. Na Obr. 9 je uvedena sušárna se čtyřmi zónami, která je určena pro umělé stárnutí hliníkových profilů po extruzi (lisování profilů). V tomto případě se jedná o atypickou ukázkou sušárny.

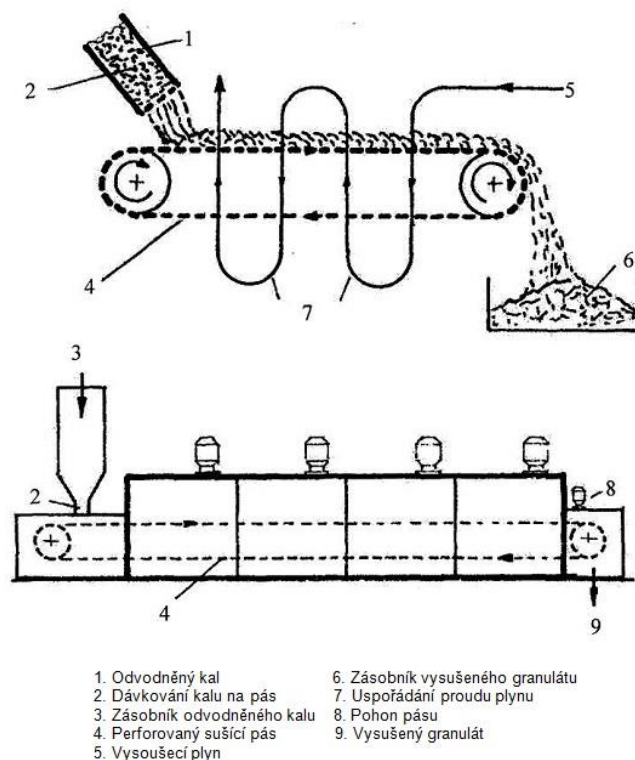


Obr. 9 Vozokomorová sušárna [11]

## Pásové sušárny

Sušený materiál vstupuje do komory na dopravním pásu. Jedná se o kontinuální provoz, kdy sušící médium prochází skrz perforovaný pás a nehybnou vrstvu. Sušárna může mít jeden vodorovný pás, kdy sušený materiál prochází několika zónami (Obr. 10) nebo několik pásů nad sebou, přičemž vsázka postupuje shora dolů. Každá zóna má svou ventilátorovou a topnou jednotku podle způsobu použití. Doba sušení je poměrně krátká – pohybuje se v řádu několika minut a závisí na rychlosti pásového dopravníku. Teplota sušení se pohybuje cca od 80 °C do 350 °C.



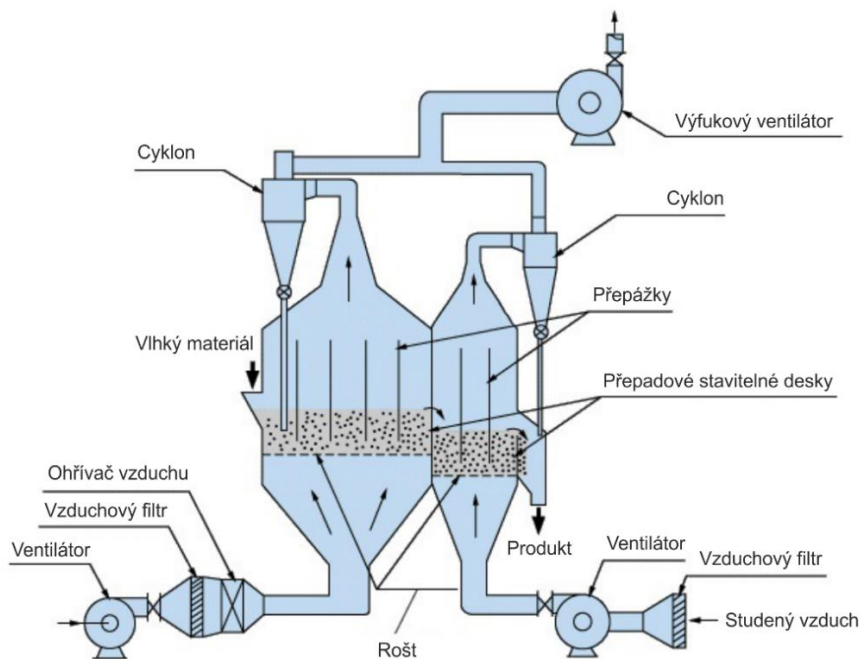


Obr. 10 Pásová sušárna [12]

Používají se převážně pro hrubší zrna, obilí, krystaly, granule, ovoce a zeleninu, ale také v automobilovém průmyslu nebo také například pro vytvrzování zalévací hmoty elektroniky senzorů.

### Fluidní sušárny

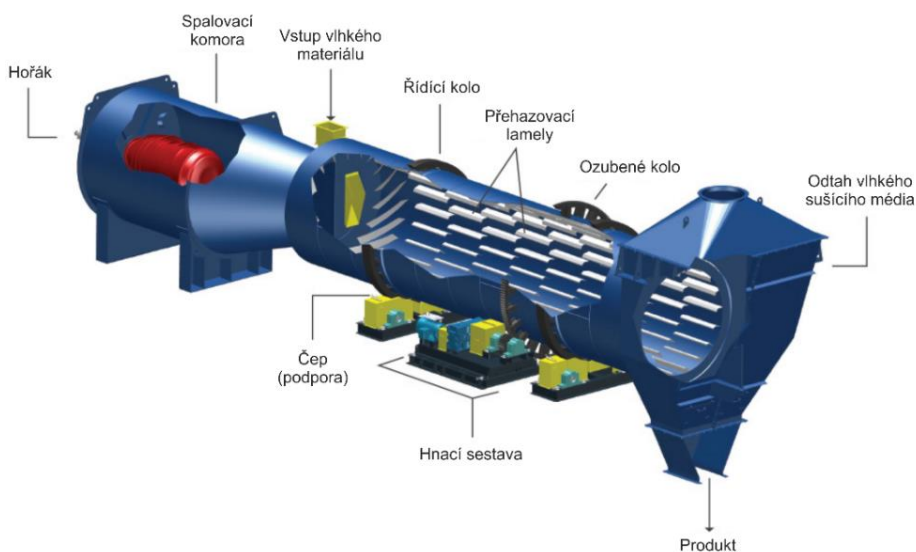
Sušárnu opět tvoří hlavní komora, v jejíž spodní části je umístěna děrovaná přepážka, kterou ze spodu proudí sušící médium. Vsázka je tak uvedena do stavu vznosu a jednotlivé částice jsou od sebe odděleny, neustále se pohybují a vzájemně se dotýkají jen krátce. Velkou výhodou těchto sušáren je vysoká účinnost, velká kapacita, kontinuální a automatický provoz se snadnou obsluhou. Jako nevýhodu lze uvést vyšší pořizovací cenu a velké množství spotřebovaného sušícího média pro udržení vsázky ve vznosu, z čehož vyplývají vysoké provozní náklady. Tento typ sušáren při stejném objemu komor, jako skříňové sušárny, nabízí až 15x vyšší výkon. Používají se pro sušení velmi jemných částic, chemikálií, krystalového cukru a vláknité materiály. Dále pro sušení pastovitých materiálů a granulových látek.



Obr. 11 Fluidní sušárna [13]

### Rotační bubnové sušárny

Sušící komoru zde tvoří rotující buben, který obsahuje konstrukční vestavby, které zvyšují kontaktní plochu se sušícím médiem. Souproudá varianta se používá pro teplotně citlivější materiály a protiproudá pro maximální dosušení, např. pro odstranění chemicky vázané vody. Buben je mírně vyspádován z důvodu mechanického a gravitačního přesýpání. Celé zařízení pracuje pouze kontinuálně. Sušení probíhá při teplotách od 120 do 180 °C pro vzduch a od 540 do 820 °C pro spaliny. Doba zdržení vsázky v bubnu se pohybuje kolem 5 až 90 minut. Nejčastěji se tento typ sušáren používá pro sypké materiály, dále pro polydisperzní materiály o velikosti částic od 100  $\mu\text{m}$  až po 0,1 m s požadavkem na delší dobu zdržení (např. keramika).

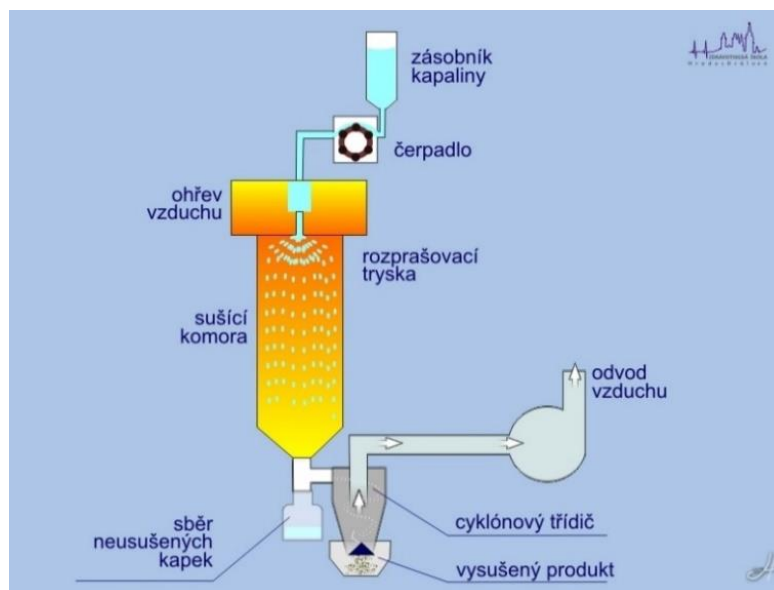


Obr. 12 Rotační bubnová sušárna [14]



## Rozprašovací sušárny

Sušení probíhá ve svisle orientované válcové komoře, která se ve spodní části zužuje. Shora je přiváděna suspenze (sušený materiál), který je pomocí trysek nebo rotujícího kotouče rozprašován ve formě malých kapiček do prostoru komory. Rychlost kapek se pohybuje až do  $150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a jejich průměr je 10 až  $100 \mu\text{m}$ . Stejným směrem je taktéž přiváděno sušící médium. Ve spodní části komory jsou zachyceny nevysušené kapky a dále je odváděn proud vzduchu se sušeným produktem do cyklónového třidiče, kde se tyto proudy od sebe oddělí. Tato technologie je vhodná zejména pro sušení mléka, vajec, dětské výživy, škrobu, glukózy, kaka, kávy, dále barviv, PVC, léčiv nebo mycích prášků.



Obr. 13 Rozprašovací sušárna [15]

### 3.9.2 Kontaktní sušárny

U tohoto typu sušáren se teplo přenáší kondukcí, kdy je sušený materiál v přímém kontaktu s vyhřívanou plochou. Sušárny mají menší tepelný odpor než konvektivní sušárny, a tím dochází k rychlejšímu ohřevu sušeného materiálu. Sušící médium vlhkost pouze odvádí, proto lze sušárny použít k šetrnějšímu sušení. Provoz sušáren je vsádkový.

### Vakuové sušárny

Sušárna skříňového typu, která je hermeticky uzavřena a tepelně izolovaná. Uvnitř se nachází police, které jsou vyhřívány pomocí horké vody nebo páry, případně lze ohřívat též plášť skříně. Na vnitřní prostor sušárny je napojena vývěva, která před sušením odsaje vzduch a při procesu sušení odvádí vlhkost do kondenzátoru. Po zkapalnění kondenzát odchází do sběrače. Sušárny jsou vhodné pro sušení menších dávek, a to zejména v laboratořích.



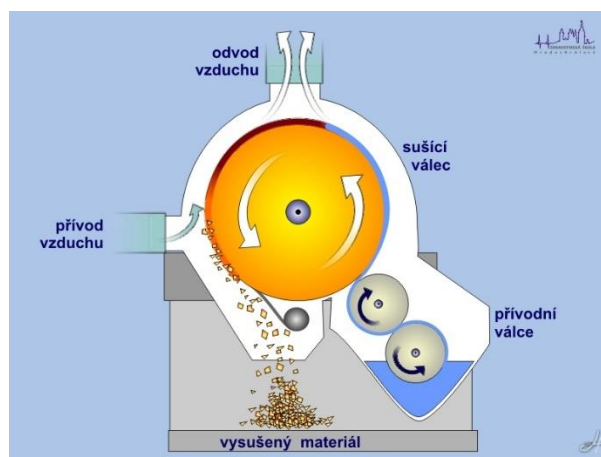
Obr. 14 Vakuová sušárna [16]

### Sublimační sušárny

Patří mezi nejnáročnější způsoby sušení (energeticky i investičně). Je to dáno množstvím spotřebované energie na zmrazení a následnou sublimaci. Vsázka je nejprve zmrazena pomocí vzduchu, chlazením kontaktních ploch, kapalnými plyny nebo vakuovým chlazením. Pokud je rychlost chlazení dostatečně velká, vytvoří se na vsázce malé krystalky, které nepoškozují strukturu buněk. Samotná sublimace probíhá za sníženého tlaku, který se pohybuje od 10 až po 100 Pa. Přiváděné teplo nesmí překročit teplotu tání ledu. Technologie je vhodná pro materiály, kde se klade velký důraz na výslednou kvalitu. Jedná se například o čaj, kávu, krevní plasmu, luštěniny, žampiony, zeleninu a ovoce.

### Válcové sušárny

Pomocí nástřiku nebo nanášecího válečku je materiál nanášen na vnější stranu rotujícího válce. Tloušťka vrstvy je menší než 0,5 mm a doba sušení trvá obvykle od 2 až do 10 vteřin. Vnitřek bubny je vyhříván nejčastěji párou. Přívodem vzduchu je vlhkost odváděna mimo sušící prostor. Sušený materiál prochází téměř celou jednou otáčkou a na závěr je seškrabován pomocí nože. Zařízení tak pracuje pouze kontinuálně a je vhodné pro pastovité nebo kapalné látky.



Obr. 15 Válcová sušárna [17]

### 3.9.3 Radiační sušárny

Tyto sušárny jsou charakteristické bezkontaktním předáváním energie do sušeného materiálu. Používají se zejména pro dosušování. Dělí se na tři typy: infračervené, dielektrické a mikrovlnné.

### **Infračervený ohřev**

Použití v automobilovém průmyslu pro sušení laku na vodní bázi a pro předeřev forem.

### **Dielektrický ohřev**

Zařízení se všeobecně vyznačuje rychlostí a vysokou účinností. Využití nalézají např. pro sušení materiálů ze dřeva.

### **Mikrovlnné sušárny**

Mikrovlny o frekvenci 900 nebo 2450 MHz pronikají do sušeného materiálu. Díky tomu je voda vypuzována na povrch materiálu.

## **3.9.4 Ostatní příklady sušáren**

### **Kondenzační sušárny**

Podobné jako komorové nebo vozokomorové, cirkulace sušícího média probíhá v uzavřeném okruhu, mají navíc kondenzační jednotku pro odvlhčení.

### **Páternosterové sušárny**

Komora ve tvaru věže, uvnitř se nachází dopravníkové police v páternosterovém provedení, samotná komora je obvykle rozdělena do více zón.

### **Vibrofluidní sušárny**

Obdoba fluidních sušáren, pohyb vsázky je zaručen pomocí vibračního dopravníku.

### **Šachtové sesypné sušárny**

Pro sypké materiály (obilí, drcené uhlí), využití gravitačního přesunu sušeného materiálu.

### **Pěnové sušárny**

Sušení ovocných a zeleninových šťáv, dále např. instantních produktů (protlaky, džusy).

### **Impaktní (tryskové) sušárny**

Sušení na páslech, které jsou tryskány horkým vzduchem, ofukování může být oboustranné (pás se pohybuje na vzduchovém polštáři). Používají se převážně pro sušení textilií, papíru, fólií nebo filmů.

### **Proudové sušárny**

Používají se pro sušení jemnozrnných materiálů (škrob, kvasinky, kostní moučka). Rychlost sušícího vzduchu je vyšší než pádová rychlost sušených částic, oddělení vzduchu a částic probíhá v cyklónu. Slouží pouze pro odstranění pouze volné vody.

### **Lopátkové sušárny**

Zařízení pracuje ve vakuovém režimu. Válcový plášť je vytápěn a ohřívá vsázku. V ose válce rotují lopatky, které mísí vsázku a roztírají ji po ploše válce. Sušárny pracují v periodickém režimu.

## 4 PLYNOVÁ MIKROTURBÍNA

Plynová mikroturbína je zařízení, které funguje podobně jako plynový kotel a navíc vyrábí elektrickou energii. Pokročilé koncepce mikroturbín mají velmi nízké emise, jediný pohyblivý díl, vzduchová ložiska a minimální nároky na údržbu. Zařízení dosahují okolo 100 tisíc otáček za minutu, mají kompaktní rozměry a nízkou hmotnost. Další velkou výhodou je univerzální využití. Uplatnění mohou nalézt pro výrobu elektrické energie a tepla v obytných komplexech, hotelích, nemocnicích či v administrativních budovách. Zkrátka se jedná o zařízení, které vyrábí elektřinu a teplo v místě spotřeby. Neení-li uvedeno jinak, je v této kapitole čerpáno ze zdrojů [18], [19] a [20].

### 4.1 Paliva pro spalovací mikroturbíny

Mezi paliva pro plynové mikroturbíny patří:

- zemní plyn
- propan
- bio plyn
- skládkový, důlní plyn
- pyrolýzní plyny
- diesel
- letecká a petrolejová paliva.

### 4.2 Rozdělení mikroturbín na základě směru proudění

#### Axiální turbína

Médium proudí ve směru, který je rovnoběžný s osou stroje, tj. osa otáčení hřídele. Lopatky u axiální turbíny jsou šikmo natočeny a usměřují tok média. Pro vyšší výkony se používá více řazených oběžných kola za sebou (vícestupňové turbíny).

#### Radiální turbína

V radiální turbíně médium mění směr. Turbíny menších výkonů jsou opatřeny pouze jedním oběžným kolem – jsou jednostupňové.

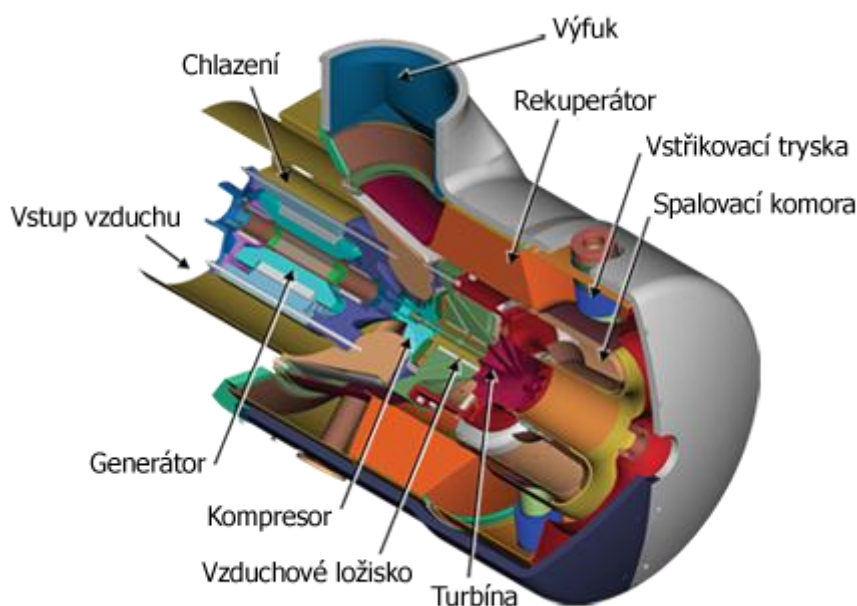
### 4.3 Popis funkce radiální mikroturbíny

Hřídel mikroturbíny je nejprve roztočena pomocí startéru. Kompresor následně nasává vzduch stlačuje a vhání do spalovací komory. Do této komory je přivedeno pod tlakem také palivo. Vzniklá směs plynů je elektricky jednorázově zapálena. Následným hořením dochází k expanzi přes oběžné kolo turbíny. Po relativně krátkém čase je hoření stabilizováno.

### 4.4 Hlavní části mikroturbín

#### Spalovací komora

Jedná se o prostor, ve kterém dochází k hoření směsi plynů. Má válcový nebo prstencový tvar. Válcový tvar (starší typ) je jednodušší, levnější a méně účinný. Prstencová komora je naopak novější, úspornější a dosahuje vyšší účinnosti. Směs je po vstupu do komory zapálena elektrickým výbojem. Hořením dochází k prudkému nárůstu tlaku. Teplota spalin na výstupu z komory má 800 až 900 °C.



Obr. 16 Hlavní části mikroturbíny [21]

### Tryska

Slouží k přivádění paliva do prostoru spalovací komory nebo hořáku.

### Hořák

Do spalovací komory přivádí směs paliva a spalovacího vzduchu.

### Spalovací turbína

V této části dochází k přeměně tlakové a tepelné energie spalin na energii mechanickou v podobě otáčivého pohybu hřídele.

### Kompresor vzduchu

Využívá se pro stlačování spalovacího vzduchu před vstupem do spalovací komory. Mikroturbíny mají většinou jen jedno oběžné kolo.

### Rekuperátor

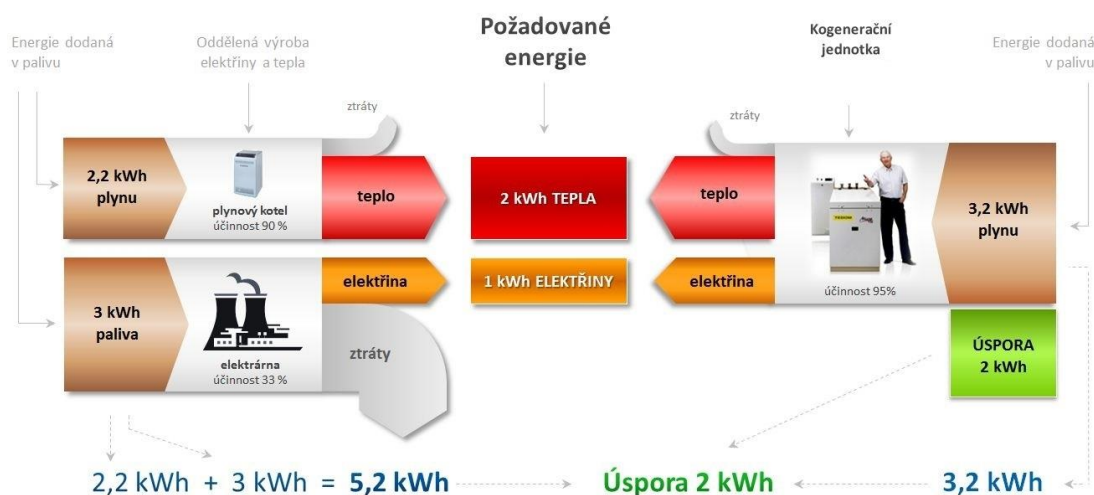
Používá se pro předehřev spalovacího vzduchu. Zvyšuje účinnost výroby elektrické energie.

## 4.5 Současná výroba tepla a elektrické energie: kogenerace

V současné době se pro výrobu tepla a elektřiny používají plynové motory a spalovací turbíny na zemní plyn nebo bioplyn. Plynový motor vychází z principu klasického benzinového motoru. Pro ohřev vody je nejprve použit chladič, ve kterém dochází k předehřevu. Voda dále postupuje do dalšího výměníku, kde je dohřívána na požadovanou teplotu pomocí tepla ze spalin. Současně motor pohání generátor pro výrobu elektrického proudu.

Velkou výhodou kogeneračních jednotek jsou malé tepelné ztráty ve srovnání s výrobou tepla a elektřiny jednotlivě. Porovnání oddělené a současné výroby je zobrazeno na Obr. 17. Díky vysokému využití energie v palivu lze dosáhnout účinnosti až 95 %, obvykle 80 až 90 %. Oproti oddělené výrobě lze ušetřit až 40 % energie v palivu a tím také dosáhnout nižších emisí.

## Úspora energie pomocí kogenerace



Obr. 17 Úspory pomocí kogenerace [22]

Nevýhody kogeneračních jednotek:

- vyšší investiční náklady na zařízení
- návratnost zařízení závisí na využití elektrické energie a tepla
- vyšší hlučnost.

### 4.6 Využití kogeneračních jednotek

Kogenerační jednotky nacházejí uplatnění ve všech odvětvích lidské činnosti. Jsou vhodné převážně do míst, která zaručují současnou spotřebu elektrické energie i tepla. Kogenerační jednotky do výkonu cca 1 MW lze umístit do kontejneru.

#### Ubytovací zařízení (hotely, ubytovny, penziony aj.)

Spotřeba tepla pro vytápění a klimatizaci.

#### Školská zařízení (koleje a internáty)

Opět velká spotřeba tepla i elektřiny. V období prázdnin dochází k velkému úpadku spotřeby.

#### Administrativní budovy (kanceláře)

Převažuje spotřeba elektrické energie. Během topné sezóny mají velkou spotřebu tepla, spotřeba teplé vody je malá.

#### Komunální výtopy

Teplá voda a teplo se dodává do budov, elektřina jde do distribuční sítě.

#### Průmyslové objekty

Jsou vhodné jen tam, kde je zaručena vlastní spotřeba elektrické energie a tepla, případně do objektů, kde jsou technologická zařízení s velkou spotřebou teplé vody.



## Čistírny odpadních vod

Při čištění odpadní vody vzniká kalový plyn, který se využívá jako palivo pro kogenerační jednotky. Teplo se využívá pro ohřev čistírenského kalu a elektřina pro pohon technologických zařízení v čistírně.

### 4.7 Plynová mikroturbína Capstone C30

Jedná se o nejmenší model plynové mikroturbíny od americké společnosti Capstone Turbine Corporation®. Její modely jsou typické tím, že hřídel není uložena v ložiscích, ale na vzduchové vrstvě. Tím odpadá potřeba mazání a provozu olejového hospodářství (čerpadla, nádrž na olej, chladič, filtry, armatury a potrubí). Vzduchová ložiska pracují na principu odstředivé síly. Jakmile se turbína rozběhne, tak se segmenty ložiska rozevrou a mezi segmenty a hřídelí se vytvoří tenká vzduchová vrstva.

Spaliny z turbín, ve kterých jsou ložiska mazána tlakovým olejem, nelze použít pro přímé sušení potravin nebo chemických výrobků.

#### Výhody mikroturbín Capstone:

- velmi nízké emise
- patentované vzduchové ložisko
- bez potřeby chladiva, maziva a oleje
- 122 U. S. patentů
- vysoká spolehlivost
- kompaktní rozměry, nízká hmotnost
- záruční doba na 5 nebo 9 let (factory protection plans)
- vzdálená správa a diagnostika.

Tab. 1 Parametry plynové mikroturbíny Capstone C30 [23]

Položka	Hodnota	Jednotka
Rozměry (šířka x hloubka x výška)	0,76 x 1,5 x 1,8	m
Hmotnost	405	kg
Jmenovitý elektrický výkon	30 (+0/-4)	kW
Elektrická účinnost	25 (±2)	%
Vlastnosti spalin		
Emise NOx při 15% O <sub>2</sub>	18	mg·m <sup>-3</sup>
Hmotnostní průtok	0,31	kg·s <sup>-1</sup>
Teplota spalin	275	°C
Energie ve spalinách	230	MJ·h <sup>-1</sup>
Hluk při plném zatížení ve vzdálenosti 10 m	65	dBA

#### 4.7.1 Emise mikroturbíny Capstone C30

V již dříve uskutečněných experimentech byly sledovány emise. Data jsou dostupná v souboru „Vybraná experimentální data.xlsx“. V následujících grafech jsou zobrazeny emise CO, NO, O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> v závislosti na naměřeném výkonu. Průběh tohoto experimentu je popsán níže (kapitola 5.3).





## 5 SUŠÍCÍ MÉDIUM – SPALINY

V praxi se nejčastěji jako sušící médium používá vzduch. Nicméně tato práce je zaměřena na přímé sušení spalinami, které se dostávají do přímého kontaktu se sušeným materiálem. Velká výhoda metody přímého sušení spočívá v úspoře financí. Odpadá nutnost pořízení výměníku tepla spaliny – vzduch. Tím lze tedy ušetřit nejen na investičních nákladech, ale také na provozních nákladech jako je údržba výměníku (čištění, opravy), ztráty tepla, prostor aj.

Jako nevýhodu přímého sušení lze uvést možnou kontaminaci sušeného materiálu, která se negativně projevuje hlavně u potravinářských produktů.

Následující kapitola je rozčleněna do několika bloků. První blok se zabývá možnostmi kontaminace potravin pomocí spalin. V další části je popsáno spalování zemního plynu, určení jeho základních fyzikálních vlastností po spálení a v poslední části se nachází ochlazení spalin pomocí vlhkého vzduchu na požadovanou teplotu.

### 5.1 Kontaminace potravin

Kontaminanty, které se mohou přes spaliny do potravin dostat, jsou obecně látky, které jsou toxikologicky závažné a jejichž únik do potravin je neúmyslný. Z pohledu kontaminace potravin spalinami závisí množství kontaminantů převážně na druhu spalovaného paliva. [24]

Maximální množství kontaminujících látek je zahrnuto v Nařízení Komise (ES) č. 1881/2006, které vstoupilo v platnost 9. 1. 2007. Nařízení udává nejvyšší přípustné množství vybraných kontaminujících látek na 1 kilogram různých druhů potravin. Nařízení a její pozměňovací akty lze nalézt na webu oficiálním Evropské Unie [25].

Kontaminanty potravin lze dle zdroje [24] rozdělit do tří základních skupin:

#### **kontaminace mikroorganismy**

- snadno zjištělná (např. viditelné zkažení)
- možná dekontaminace i prevence

#### **kontaminace chemickými látkami**

- negativní účinek se dostaví po delší době
- obtížné, zdlouhavé a nákladné vyšetření
- problematická prevence
- dekontaminace není často možná

#### **mechanická kontaminace**

- sklo, omítka, úlomky, nátěry, kamínky, šroubky, drátky, skořápky a jiné
- snadné zjištění, efekt se projeví hned
- snadná prevence.

V případě možné kontaminace potravin spalinami mluvíme tedy o kontaminaci chemickými látkami. Látky kontaminující potraviny reálně nesmí překročit maximální stanovený limit, v ideálním případě tam nemají být vůbec, nebo jen v přirozených koncentracích. Přítomnost kontaminantů posuzuje hygienik-toxikolog. Mezi nejvýznamnější kontaminant potravin původem ze spalin patří polycyklické aromatické uhlovodíky. [24]

### 5.1.1 Polycyklické aromatické uhlovodíky

Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU) nebo také PAHs jako termín z angličtiny (polycyclic aromatic hydrocarbons), vznikají při spalování organických sloučenin za omezeného přístupu kyslíku. Tento děj probíhá při teplotách 500 až 900 °C a podle pokusů na zvířatech je karcinogenní. Nejvýznamnějším zástupcem je benzo(a)pyren (C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>), který je nejvíce sledován. Jako další lze uvést např. benz(a)antracen, fluorathen a perylen. Ve srovnání s tuhými palivy mají plynná paliva několikanásobně menší podíly PAU. Nejméně PAU obsahují spaliny zemního plynu. [26]

Pro člověka jsou zdrojem těchto látek nejčastěji potraviny, denní příjem se v evropských zemích pohybuje mezi 14 až 270 ng/osobu. Množství PAU lze nejčastěji nalézt v grilovaných a uzených výrobcích, tucích, olejích, v sušeném ovoci, cereáliích atd. [26]

Obsah PAU ve spalinách lze snížit:

- dostatečným přebytkem spalovacího vzduchu
- spalovací teplotou vyšší než 1000 °C
- pokud možno ideálním promícháním paliva a vzduchu
- spalováním paliv v zařízeních, pro která jsou navržena
- dostatečně dlouhou dobou pobytu spalin ve spalovacím prostoru. [27]

U staršího modelu mikroturbíny Capstone 330 je koncentrace PAU ve spalinách v řádech desítek ng/m<sup>3</sup> (při normálním tlaku a teplotě 25°C).

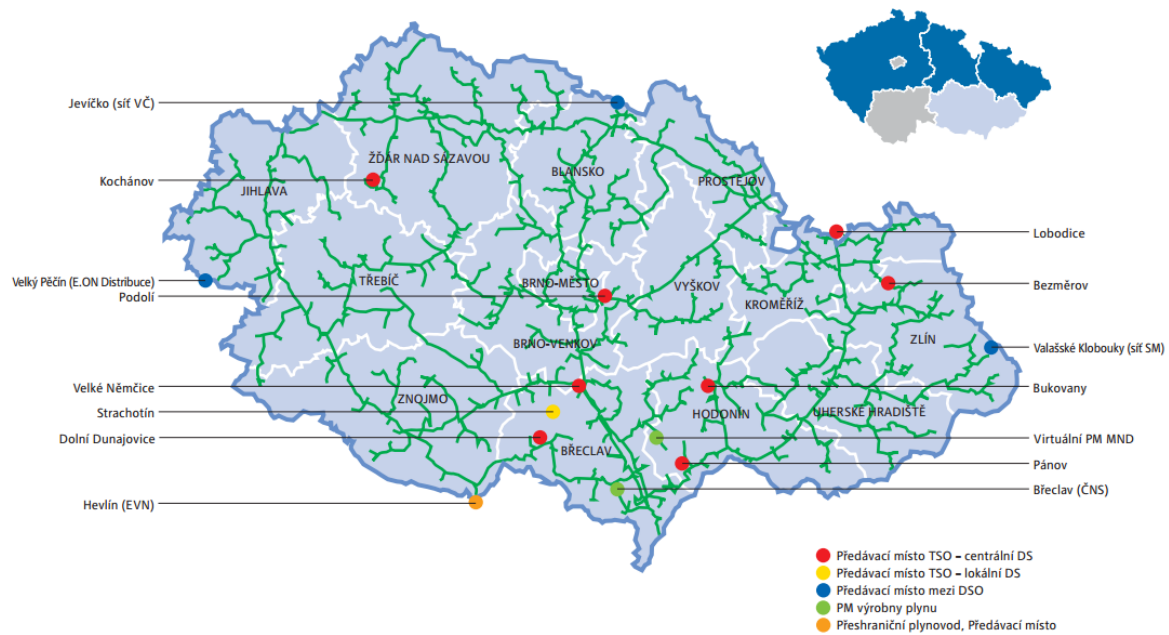
### 5.1.2 Závěrem ke kontaminaci

I přes výše zmíněné kontaminanty lze předpokládat, že plynová mikroturbína Capstone C30 je vhodná i pro přímé sušení surovin pro potravinářský průmysl, pokud však spaluje zemní plyn. Avšak například dle zdroje [28] je metoda přímého sušení pro obiloviny přípustná pouze pro krmné účely. Ovšem v praxi se zřejmě spaliny běžně používají i pro přímé sušení potravin. To dokládá rozhovor s Ing. Martinem Hutařem: „Sušení probíhá teplým vzduchem pomocí tepelného výměníku. Odlišujeme se tak od běžných výrobců, kteří v sušicích linkách bohužel běžně využívají sušení spalinami ze zemního plynu. To může negativně ovlivnit kvalitu konečného produktu. Náš postup je sice energeticky náročnější, ale zaručuje vyšší kvalitu zpracovávané suroviny a následně finálního výrobku“. Tento rozhovor byl zveřejněn na serveru, který se zabývá bio produkty [29], M. Hutař je spoludávatelem firmy PRO-BIO, s. r. o., která se zabývá výrobou bio mouky.

Zde však záleží na posouzení otázky, co je ekonomicky a zdravotně výhodnější. Množství látek, které mohou kontaminovat potraviny lze určit pomocí detailnější analýzy spalin.

## 5.2 Složení spalovaného plynu pro výpočet

Na Obr. 18 je zobrazena distribuční síť rozvodů plynu společnosti RWE, která na svém webu také zveřejňuje informace o jeho složení. Data pro určení složení spalovaného plynu jsou odebrána z místa měření, které leží na trase k Brnu a je mu nejbližší, jedná se o Velké Němčice. Společnost RWE rovněž zveřejňuje informace o složení zpětně do minulosti, proto jsou potřebné údaje k určení složení zemního plynu snadno dohledatelné. V případě této práce se jedná o srpen 2014, kdy proběhlo měření na plynové mikroturbíně. Od tohoto měření se odvíjí vstupní parametry pro výpočty.



Obr. 18 Distribuční soustava společnosti RWE na jižní Moravě [30]

Konečné složení zemního plynu (Tab. 2) je určeno pomocí aritmetického průměru jednotlivých měření. Měření proběhlo v srpnu 2014 ve Velkých Němčicích. Položka C6+, která zastupuje zbývající vyšší uhlovodíky je nahrazena pro výpočty hexanem.

Tab. 2 Složení spalovaného plynu [31]

Složky zemního plynu		Měření 1	Měření 2	Měření 4	Měření 5	Aritmetický průměr	
		[mol %]	[mol %]	[mol %]	[mol %]	[mol %]	[-]
Metan	CH <sub>4</sub>	96,581	96,600	96,577	96,573	96,583	0,96583
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,174	2,151	2,177	2,180	2,171	0,02171
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,312	0,314	0,313	0,314	0,313	0,00313
iso-Butan	iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,00063
n-Butan	nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,051	0,051	0,051	0,051	0,051	0,00051
iso-Pentan	iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,00010
n-Pentan	nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,00007
C6+	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,00015
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	0,218	0,214	0,218	0,218	0,217	0,00217
Dusík	N <sub>2</sub>	0,569	0,575	0,569	0,569	0,571	0,00571
Celkem		100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	1,000

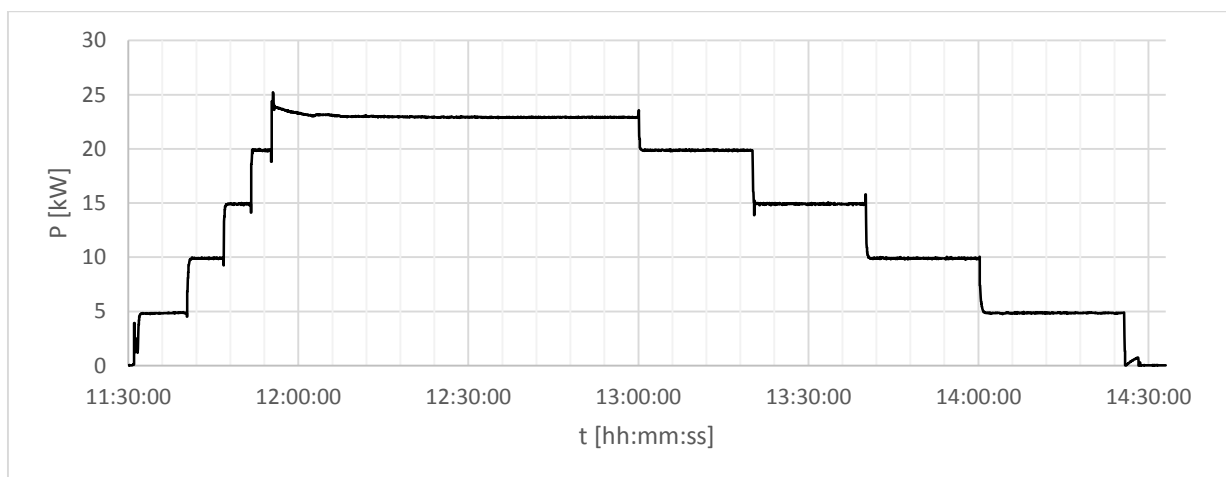
### 5.3 Parametry z experimentu

Pro výpočty spalovacího vzduchu, množství spalin a jeho složení je nezbytné stanovit vstupní parametry. Je možné je získat buď z katalogu, nebo z experimentu. Aby výsledky co nejdříve vystihovaly skutečnost, je zvolena varianta stanovení vstupních parametrů z experimentu. K tomuto experimentu je rovněž vztaženo výše určené složení zemního plynu.

Zvolené experimentální parametry:

- spotřeba zemního plynu
- přebytek kyslíku v suchých spalinách
- teplota spalin.

Všechny tři parametry jsou odebírány ve stejných časových intervalech. Intervaly se nachází v úsecích, ve kterých je výkon turbíny již ustálený. Průběh jednotlivých stupňů výkonů je znázorněn v následujícím grafu (Graf 3). Levá část grafu zobrazuje postupné spouštění plynové mikroturbíny na teoretický výkon 25 kW. Intervaly jsou určeny pro teoretické výkony 25, 20, 15, 10 a 5 kW. Z grafu je také zřejmé, že nejvyšší naměřený výkon neodpovídá výkonu teoretickému. To je způsobeno odlišnými provozními podmínkami od teoretických. Tlak nasávaného plynu, jeho výhřevnost, a spalovací vzduch (teplota a tlak) se liší od výpočtových hodnot. Ostatní naměřené výkony odpovídají výkonům teoretickým.



Graf 3 Průběh jednotlivých stupňů výkonů mikroturbíny v čase

#### 5.3.1 Spotřeba zemního plynu při výkonu 25 kW

Spotřeba plynu je stanovena odečtem z plynoměru a přepočtem na normální podmínky. Dále množství kyslíku ve spalinách a teplota spalin jsou vypočteny jako aritmetické průměry z naměřených hodnot ve zvolených časových intervalech.

Stav plynoměru na počátku měřeného úseku.

$$V_{ZP1} = 86,17 \text{ m}^3$$

Stav plynoměru na konci měřeného úseku.

$$V_{ZP2} = 95,77 \text{ m}^3$$

Délka časového úseku pro výpočet spotřeby zemního plynu.

$$t_{ZP,cas} = 2806 \text{ s}$$

Průtok spalovaného zemního plynu.

$$\dot{V}_{ZP} = \frac{V_{ZP2} - V_{ZP1}}{t_{ZP,cas}} \cdot 3600 = \frac{95,77 - 86,17}{2806} \cdot 3600 = 12,316 \frac{m^3}{h} \quad (5.1)$$

### Přepočet spotřeby plynu na normální podmínky (NP)

Odhadovaná teplota plynu v potrubí.

$$t_{ZP} = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{ZP} = 15 + 273,15 = 288,15 \text{ K} \quad (5.2)$$

Průměrný tlak v laboratoři, který byl naměřen při experimentu.

$$p_{EX} = 98,114 \text{ kPa}$$

Přetlak v potrubí.

$$p_{PP} = 2,000 \text{ kPa}$$

Absolutní tlak je dán součtem tlaku v laboratoři a tlaku v potrubí.

$$p_{ABS} = p_{EX} + p_{PP} = 98,114 + 2,000 = 100,114 \text{ kPa} \quad (5.3)$$

Spotřeba plynu při normálních podmínkách (teplota 0°C a tlak 101,325 kPa).

$$\dot{V}_{ZP,NP} = \dot{V}_{ZP} \cdot \frac{p_{ABS} \cdot 273,15}{T_{ZP} \cdot 101,325} = 12,316 \cdot \frac{100,114 \cdot 273,15}{288,15 \cdot 101,325} = 11,536 \frac{Nm^3}{h} \quad (5.4)$$

### 5.3.2 Teplota spalin

Teplota je stanovena jako průměrná hodnota z daného měřeného úseku.

$$t_{SP} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{h,t}} t_{SP,i}}{n_{h,t}} = \frac{431672,841}{1404} = 307,459 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.5)$$

### 5.3.3 Přebytek kyslíku v suchých spalinách

Opět výpočet pomocí aritmetického průměru z naměřených hodnot.

$$\varphi_{O2,SP} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{h,O2}} \varphi_{O2,SP,i}}{n_{h,O2}} = \frac{23789,4}{1320} = 18,022 \text{ obj. } \% \quad (5.6)$$

Stejným způsobem jsou přepočteny hodnoty pro ostatní teoretické výkony. V této práci je výpočet proveden pro nejvyšší teoretický výkon (25 kW), nicméně v modelu vytvořeném v programu MS Excel je možné zvolit i nižší výkon z výše zmíněných. Experimentální data jsou k dispozici v souboru „Vybraná experimentální data.xlsx“.

## 5.4 Spalovací vzduch

Jako spalovací vzduch je uvažován vlhký vzduch z okolního prostředí. Patří mezi nejrozšířenější okysličovačla, protože obsahuje přibližně 21 % obj. kyslíku, který je naprosto nezbytný pro spalování. Vzduch je velmi dobře dostupný a jeho cena je nejnižší ve srovnání s jinými variantami. Pro spalovací procesy, kde je potřeba většího množství kyslíku lze použít také čistý kyslík. Vlhký vzduch je směsí suchého vzduchu a vodní páry.

Parametry, které popisují spalovací vzduch, jsou: teplota, tlak, relativní vlhkost (v modelu uživatelsky volitelné položky) a složení suchého vzduchu.

#### 5.4.1 Vstupní hodnoty vzduchu

$$\begin{aligned}
 t_{SPVZ} &= 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 p_{SPVZ} &= 98 \text{ kPa} \\
 \varphi_{SPVZ} &= 55 \%
 \end{aligned}$$

Složení suchého vzduchu dle mezinárodní dohody je uvedeno v Tab. 3. Pro směs ideálních plynů platí, že objemový zlomek je totožný, jako molární zlomek ( $\varphi_i = x_i$ ).

Tab. 3 Složení suchého vzduchu

Složka i	$x_{i,s,SPVZ}$ [mol %]
N <sub>2</sub>	78,080
O <sub>2</sub>	20,950
Ar	0,940
CO <sub>2</sub>	0,030
H <sub>2</sub> O	0,000
Celkem	100,000

#### 5.4.2 Výpočet složení vlhkého spalovacího vzduchu

Protože známe složení suchého vzduchu, které je považováno za neměnné, je nezbytné určit složení vzduchu vlhkého. V něm vodní pára tvoří proměnou složku a až na základě výpočtu je určeno konečné složení spalovacího vzduchu. K výpočtu složí Antoineova rovnice, ze které je vypočten tlak nasycených par – rovnice (5.7). Tato hodnota je použita pro výpočet parciálního tlaku vodní páry ve vlhkém vzduchu o zadané relativní vlhkosti – vztah (5.8). V poslední fázi je určen molární zlomek H<sub>2</sub>O ve vlhkém vzduchu.

Výpočet tlaku nasycených par H<sub>2</sub>O při zadané teplotě.

Antoineova rovnice obsahuje experimentálně zjištěné koeficienty A, B a C (Tab. 4). Teplota je zadávána ve °C a vypočtený tlak je v kPa.

Tab. 4 Konstanty Antoineovy rovnice pro H<sub>2</sub>O

Pro 1 až 100 °C	
A	7,19621
B	1730,63
C	233,426

$$\log p_{H_2O}'' = A - \frac{B}{C + t_{SPVZ}} \quad (5.7)$$

$$p_{H_2O}'' = 10^{\left(A - \frac{B}{C + t_{SPVZ}}\right)} = 10^{\left(7,19621 - \frac{1730,63}{233,426 + 20}\right)} = 2,330 \text{ kPa}$$

Parciální tlak H<sub>2</sub>O ve vlhkém vzduchu.

$$p_{H_2O} = \frac{\varphi_{SPVZ}}{100} \cdot p_{H_2O}'' = \frac{55}{100} \cdot 2,330 = 1,281 \text{ kPa} \quad (5.8)$$

Molární zlomek H<sub>2</sub>O ve vlhkém vzduchu.

$$x_{H_2O,v,SPVZ} = \frac{p_{H_2O}}{p_{SPVZ}} = \frac{1,281}{98} = 0,01307 [-] \quad (5.9)$$

### Složení vlhkého vzduchu

Molární koncentrace H<sub>2</sub>O ve vlhkém vzduchu je již známa. Pro výpočet ostatních složek je použit vztah (5.10). Výsledné složení vlhkého spalovacího vzduchu včetně střední molární hmotnosti je v Tab. 5.

$$x_{i,v,SPVZ} = x_{i,s,SPVZ} \cdot (1 - x_{H_2O,v,SPVZ}) \quad (5.10)$$

$$MW_{v,SPVZ,stř} = \sum MW_{i,v,SPVZ} \cdot x_{i,v,SPVZ} \quad (5.11)$$

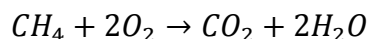
Tab. 5 Vlastnosti vlhkého vzduchu

Složka i	$x_{i,v,SPVZ} [-]$	$MW_{i,v,SPVZ} [\text{kg/kmol}]$	$MW_{i,v,SPVZ} \cdot x_{i,v,SPVZ}$
N <sub>2</sub>	0,77059	28,013	21,587
O <sub>2</sub>	0,20676	31,999	6,616
Ar	0,00928	39,948	0,371
CO <sub>2</sub>	0,00030	44,010	0,013
H <sub>2</sub> O	0,01307	18,015	0,236
Celkem	1,000	$MW_{v,SPVZ,stř}$	28,822 [kg/mol]

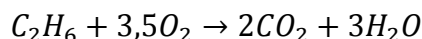
## 5.5 Spalování zemního plynu

Vzduch, který vstupuje do plynové mikroturbíny je již určen. Tato podkapitola zahrnuje samotné spalování. Dokonalé (stechiometrické) spalování uhlovodíků ze vstupujícího zemního plynu probíhá podle následujících rovnic:

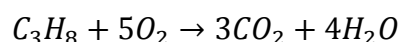
Metan



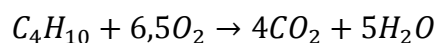
Etan



Propan

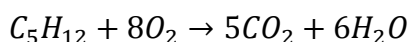


iso-Butan, n-Butan

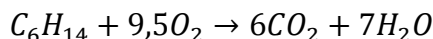




iso-Pentan, n-Pentan



Hexan



### 5.5.1 Stechiometrické výpočty

V této části jsou vypočteny počty [kmol] jednotlivých složek spalín ( $CO_2$  a  $H_2O$ ) a spotřeba kyslíku při spálení 1 kmol zemního plynu za předpokladu, že  $N_2$  a  $CO_2$  obsažené v zemním plynu se reakce neúčastní a spalovací komorou pouze prostupují. Tyto výpočty dále poslouží pro určení množství spalín a spalovacího vzduchu. Tab. 6 zahrnuje dosazení stechiometrických koeficientů dle výše zmíněných spalovacích rovnic. Hodnota udává počet kmol pro spálení 1 kmol uhlovodíku. V pravé části je složení zemního plynu.

Tab. 6 Přiřazení stechiometrických koeficientů ke složkám plynu

Složka i		Spotřeba $O_2$	Vytvoření $CO_2$	Vytvoření $H_2O$	Molární zlomek	
		$S_{i,O_2}$	$S_{i,CO_2}$	$S_{i,H_2O}$	$x_i$	
		[kmol/kmol]	[kmol/kmol]	[kmol/kmol]	[mol %]	[-]
Metan	$CH_4$	2	1	2	96,583	0,96583
Etan	$C_2H_6$	3,5	2	3	2,171	0,02171
Propan	$C_3H_8$	5	3	4	0,313	0,00313
iso-Butan	$iC_4H_{10}$	6,5	4	5	0,063	0,00063
n-Butan	$nC_4H_{10}$	6,5	4	5	0,051	0,00051
iso-Pentan	$iC_5H_{12}$	8	5	6	0,010	0,00010
n-Pentan	$nC_5H_{12}$	8	5	6	0,007	0,00007
C6+	$C_6H_{14}$	9,5	6	7	0,015	0,00015
Oxid uhličitý	$CO_2$	–	–	–	0,217	0,00217
Dusík	$N_2$	–	–	–	0,571	0,00571

Při spalování se kyslík spotřebovává (ze spalovacího vzduchu) a oxid uhličitý a voda naopak vytváří. Rovnice (5.12) až (5.14) tuto skutečnost zohledňují s ohledem na složení spalovaného plynu. Shrnutí se nachází v Tab. 7.

Množství spotřebovaného  $O_2$  při spálení 1 kmol zemního plynu.

$$n_{1,O_2} = \sum S_{i,O_2} \cdot x_i \text{ [kmol/kmol]} \quad (5.12)$$

Množství vytvořeného  $CO_2$  při spálení 1 kmol zemního plynu.

$$n_{1,CO_2} = \sum S_{i,CO_2} \cdot x_i \text{ [kmol/kmol]} \quad (5.13)$$



Množství vytvořené H<sub>2</sub>O při spálení 1 kmol zemního plynu.

$$n_{1,H_2O} = \sum S_{i,H_2O} \cdot x_i \text{ [kmol/kmol]} \quad (5.14)$$

Tab. 7 Stechiometrické výpočty

Složka i		Spotřeba O <sub>2</sub>	Vytvoření CO <sub>2</sub>	Vytvoření H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
		S <sub>i,O<sub>2</sub></sub> ·x <sub>i</sub>	S <sub>i,CO<sub>2</sub></sub> ·x <sub>i</sub>	S <sub>i,H<sub>2</sub>O</sub> ·x <sub>i</sub>	
Metan	CH <sub>4</sub>	1,9317	0,9658	1,9317	–
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,0760	0,0434	0,0651	–
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,0157	0,0094	0,0125	–
iso-Butan	iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,0041	0,0025	0,0032	–
n-Butan	nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,0033	0,0020	0,0026	–
iso-Pentan	iC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,0008	0,0005	0,0006	–
n-Pentan	nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,0006	0,0004	0,0004	–
C6+	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,0014	0,0009	0,0011	–
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	–	0,0022	–	–
Dusík	N <sub>2</sub>	–	–	–	0,0057
		n <sub>1,O<sub>2</sub></sub>	n <sub>1,CO<sub>2</sub></sub>	n <sub>1,H<sub>2</sub>O</sub>	n <sub>1,N<sub>2</sub></sub>
Celkem		2,0335	1,0271	2,0171	0,0057
[kmol/kmol spáleného zemního plynu]					

## 5.6 Spotřeba spalovacího vzduchu při přebytku kyslíku v suchých spalinách

V předchozí části byly spočteny celková množství spotřebovaného O<sub>2</sub> a vyprodukovaného CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O pro spálení 1 kmol plynu. Vztahy (5.16), (5.18), (5.19) a (5.20) slouží k výpočtu množství při dané spotřebě zemního plynu. Ta je přepočtena na příslušné jednotky – rovnice (5.15).

Přepočet spotřeby zemního plynu z Nm<sup>3</sup>/h na kmol/h.

$$\dot{n}_{ZP} = \frac{11,536}{22,414} = 0,515 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \quad (5.15)$$

Spotřeba kyslíku pro stechiometrické spálení plynu.

$$\dot{n}_{O_2} = \dot{n}_{ZP} \cdot n_{1,O_2} = 0,515 \cdot 2,0335 = 1,047 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \quad (5.16)$$

Spotřeba spalovacího vzduchu pro stechiometrické spálení plynu.

$$\dot{n}_{\alpha,v,SPVZ} = \frac{\dot{n}_{O_2}}{x_{O_2,v,SPVZ}} = \frac{1,047}{0,20676} = 5,062 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \quad (5.17)$$

Množství N<sub>2</sub> ze zemního plynu.

$$\dot{n}_{N_2} = \dot{n}_{ZP} \cdot n_{1,N_2} = 0,515 \cdot 0,0057 = 0,003 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \quad (5.18)$$

Množství vyprodukovaného CO<sub>2</sub>.

$$\dot{n}_{CO_2} = \dot{n}_{ZP} \cdot n_{1,CO_2} = 0,515 \cdot 1,0271 = 0,529 \frac{kmol}{h} \quad (5.19)$$

Množství vyprodukované H<sub>2</sub>O.

$$\dot{n}_{H_2O} = \dot{n}_{ZP} \cdot n_{1,H_2O} = 0,515 \cdot 2,0171 = 1,038 \frac{kmol}{h} \quad (5.20)$$

### Průtok spalovacího vzduchu bez přebytku

Jednotlivé složky spalovacího vzduchu při spalování bez přebytku kyslíku jsou dány součinem jednotlivých složek vlhkého vzduchu a celkovou spotřebou vlhkého vzduchu, vztah (5.21).

$$\dot{n}_{i,\alpha,v,SPVZ} = x_{i,v,SPVZ} \cdot \dot{n}_{\alpha,v,SPVZ} \quad (5.21)$$

Tab. 8 Průtok spalovacího vzduchu bez přebytku

Složka i	Průtok spalovacího vzduchu [kmol/h]
N <sub>2</sub>	3,901
O <sub>2</sub>	1,047
Ar	0,047
CO <sub>2</sub>	0,001
H <sub>2</sub> O	0,066
Celkem	5,062

### Spaliny bez přebytku

Po spálení plynu bez přebytku kyslíku není tento prvek zastoupen ve spalinách. K CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O z vypočteného vlhkého vzduchu je nutné přičíst jejich vyprodukované množství spalováním. Dále k N<sub>2</sub> ve spalovacím vzduchu je potřeba přičíst dusík obsažený v samotném spalovaném plynu (Tab. 9). Po odstranění vody jsou získány suché spaliny, pravá část tabulky.

Tab. 9 Spaliny bez přebytku kyslíku

Složka i	Vlhké spaliny [kmol/h]	Suché spaliny [kmol/h]
N <sub>2</sub>	3,903	3,903
O <sub>2</sub>	0	0
Ar	0,047	0,047
CO <sub>2</sub>	0,530	0,530
H <sub>2</sub> O	1,104	0
	$\dot{n}_{\alpha,v,SP}$	$\dot{n}_{\alpha,s,SP}$
Celkem	5,585	4,481

Výše určené suché spaliny jsou bez přebytku kyslíku, avšak v těchto spalínách bylo experimentem naměřeno určité množství  $O_2$ . Pro určení přebytkového suchého spalovacího vzduchu je použit vztah (5.22).

$$\dot{n}_{p,s,SPVZ} = \frac{x_{O_2,s,SP} \cdot \dot{n}_{\alpha,s,SP}}{x_{O_2,s,SPVZ} - x_{O_2,s,SP}} = \frac{0,18022 \cdot 4,481}{0,20950 - 0,18022} = 27,581 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \quad (5.22)$$

Celkové množství suchých spalin je dáno součtem spalin bez přebytku kyslíku a přebytku suchého spalovacího vzduchu. Výpočet je proveden podle rovnice (5.23). Právě v tomto množství byl experimentálně změřen kyslík.

$$\dot{n}_{s,SP} = \dot{n}_{\alpha,s,SP} + \dot{n}_{p,s,SPVZ} = 4,481 + 27,581 = 32,061 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \quad (5.23)$$

Pro určení molárního zlomku jednotlivých složek suchých spalin je použit vztah (5.24). Nevztahuje se na výpočet kyslíku, protože ten je zadán (experimentálně naměřen).

$$x_{i,s,SP} = \frac{\dot{n}_{i,\alpha,v,SP} + \dot{n}_{i,p,s,SPVZ} \cdot x_{i,v,SPVZ}}{\dot{n}_{s,SP}} \quad (5.24)$$

Molární průtok  $O_2$  v suchých spalínách při daném přebytku kyslíku.

$$\dot{n}_{O_2,s,SP} = x_{O_2,s,SP} \cdot \dot{n}_{s,SP} = 0,18022 \cdot 32,061 = 5,778 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \quad (5.25)$$

Molární průtok ostatních složek.

$$\dot{n}_{i,s,SP} = x_{i,s,SP} \cdot \dot{n}_{s,SP} \quad (5.26)$$

Tab. 10 Parametry suchých spalin

Složka i	Suché spaliny při přebytku $O_2$	
	[obj. %]	[kmol/h]
$N_2$	79,343	25,439
$O_2$	18,022	5,778
Ar	0,955	0,306
$CO_2$	1,679	0,538
$H_2O$	0	0
Celkem	100,000	32,061

Protože spalovací vzduch není suchý, ale vlhký, je nezbytné určit množství  $H_2O$ , která je obsažena ve vlhkém přebytkovém vzduchu. Suchý přebytkový vzduch se určí rozdílem celkových suchých spalin a suchých spalin při spalování bez přebytku (Tab. 11, levá část). Molární průtok  $H_2O$  ve vlhkém přebytkovém vzduchu je vypočten dle vztahu (5.27).

$$\dot{n}_{H_2O,p,v,SPVZ} = \frac{x_{H_2O,v,SPVZ} \cdot \dot{n}_{p,s,SPVZ}}{1 - x_{H_2O,v,SPVZ}} = \frac{0,01307 \cdot 27,581}{1 - 0,01307} = 0,365 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \quad (5.27)$$

Tab. 11 Přebytkový vzduch

Složka i	Přebytkový suchý vzduch	Přebytkový vlhký vzduch
	[kmol/h]	[kmol/h]
N <sub>2</sub>	21,535	21,535
O <sub>2</sub>	5,778	5,778
Ar	0,259	0,259
CO <sub>2</sub>	0,008	0,008
H <sub>2</sub> O	0	0,365
	$\dot{n}_{p,s,SPVZ}$	$\dot{n}_{p,v,SPVZ}$
Celkem	27,581	27,946

Celkové vlhké spaliny jsou dány součtem vlhkých spalin bez přebytku spalovacího vzduchu a vlhkého přebytkového vzduchu (Tab. 12).

Tab. 12 Vlhké spaliny

Složka i	Celkové vlhké spaliny	
	[kmol/h]	[obj. %]
N <sub>2</sub>	25,439	75,866
O <sub>2</sub>	5,778	17,232
Ar	0,306	0,913
CO <sub>2</sub>	0,538	1,606
H <sub>2</sub> O	1,470	4,383
	$\dot{n}_{v,SP}$	
Celkem	33,531	100,000

Výpočet střední molární hmotnosti vlhkých spalin.

$$MW_{v,SP,stř} = \sum MW_{i,v,SP} \cdot x_{i,v,SP} = 28,628 \frac{kg}{kmol} \quad (5.28)$$

## 5.7 Ochlazení spalin na požadovanou teplotu

Jedná se uzel – směšovač, do kterého vstupují spaliny z mikroturbíny a vlhký vzduch z okolního prostředí. Tento vzduch má za úkol ochladit spaliny na požadovanou (danou) teplotu. Je uvažováno, že děj probíhá ideálně, bez jakýchkoliv ztrát. Spaliny i vzduch mají rozdílné tepelené toky, ale v okamžiku, kdy se tyto plyny smísí, dojde ke vzniku nového proudu plynu. Tento výpočet vychází ze vztahu (5.33). Ještě před samotným výpočtem je nutné znát střední měrné teplo spalin a chladícího vzduchu.

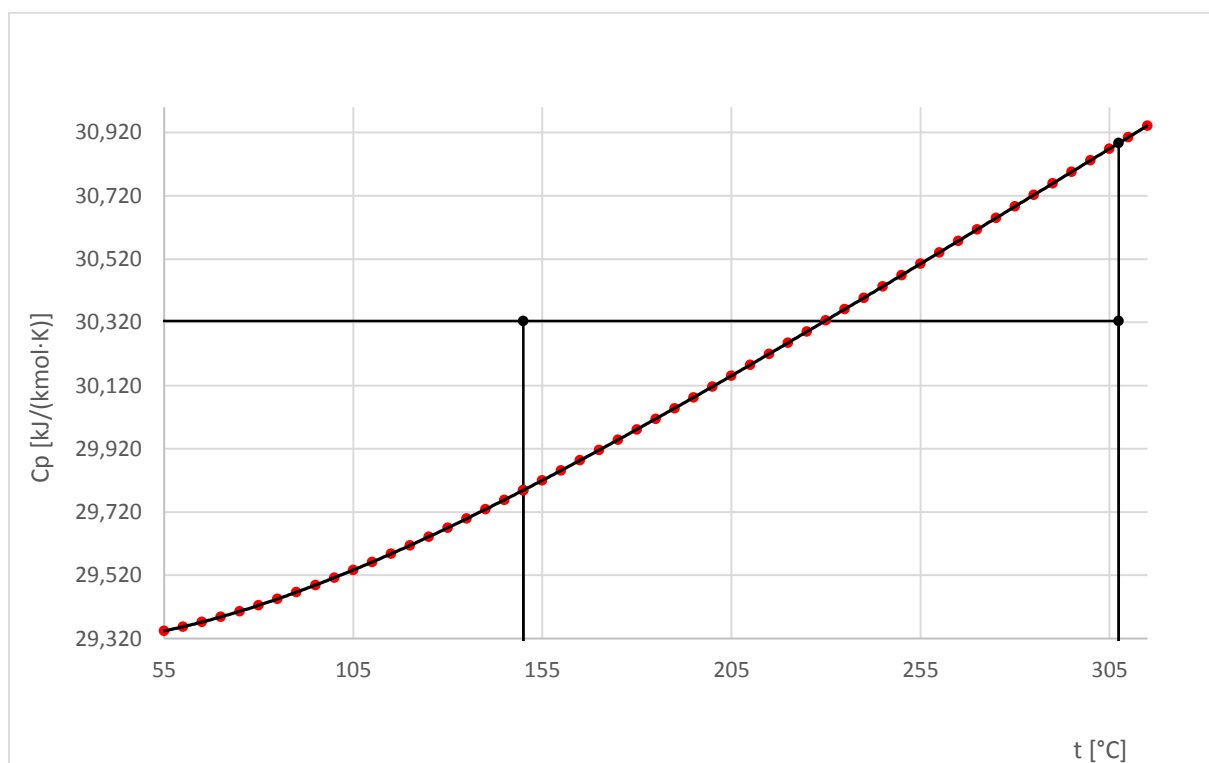
### 5.7.1 Výpočty středního měrného tepla

Výpočet měrného tepla pro směs plynu je proveden pomocí polynomickeho rozvoje dle vztahu (5.29), kde A, B, C, D a E jsou koeficienty mocninného rozvoje jednotlivých složek. Vztah je zapsán obecně.

$$Cp = \sum \left[ \left( A_i + B_i \cdot T + C_i \cdot T^2 + D_i \cdot T^3 + \frac{E_i}{T^2} \right) \cdot x_i \right] \quad (5.29)$$

Měrné teplo je funkcí teploty a pro dané teplotní rozmezí je třeba určit střední hodnotu měrného tepla. Průběhy jednotlivých závislostí měrných tepel na teplotě vypočtené podle výše uvedeného vztahu pro spaliny a chladicí vzduch je zobrazen v následujících grafech. Jelikož teplota spalin, vstupní teplota chladicího vzduchu i požadovaná teplota jsou proměnné hodnoty, je třeba výpočet pro model „automatizovat“. Proto je pro výpočet střední hodnoty zvolena numerická integrace pomocí Simpsonovy metody, rovnice (5.30). Algoritmus výpočtu integrálu spočívá v načtení průběhu Cp na teplotě. Po integraci je určeno střední měrné teplo pro dané teplotní rozmezí dle vztahů (5.31) a (5.32). Teplota sušicího média je uvažována 150 °C.

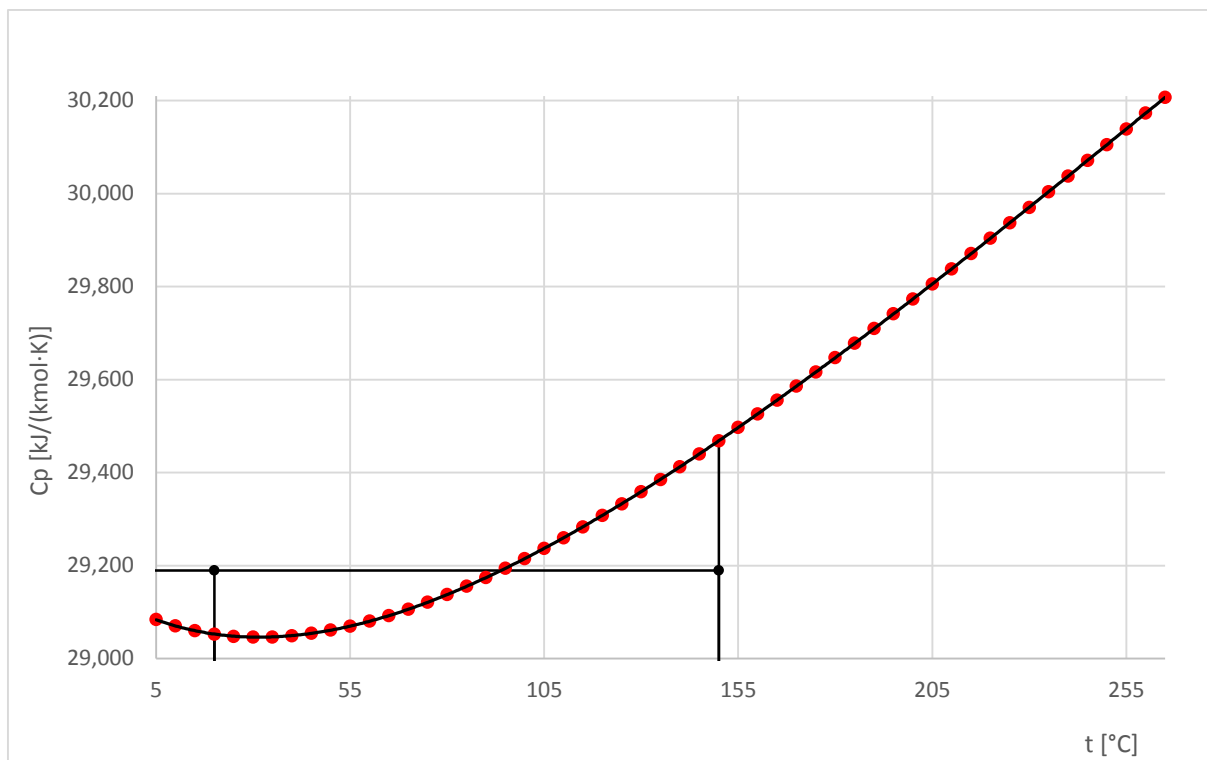
$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{3} \left[ f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_{2i}) + 4 \sum_{i=1}^n f(x_{2i-1}) + f(x_{2n}) \right] \quad (5.30)$$



Graf 4 Závislost měrného tepla spalin na teplotě

$$\bar{Cp}_{SP} = \frac{1}{T_{SP} - T_{SM}} \cdot \int_{T_{SM}}^{T_{SP}} Cp_{SP} \quad (5.31)$$

$$\bar{Cp}_{SP} = 30,324 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$



Graf 5 Závislost měrného tepla vzduchu na teplotě

$$\bar{c}_{p_{CVZ}} = \frac{1}{T_{SM} - T_{CVZ}} \cdot \int_{T_{CVZ}}^{T_{SM}} c_{p_{CVZ}} \quad (5.32)$$

$$\bar{c}_{p_{CVZ}} = 29,190 \frac{kJ}{kmol \cdot K}$$

### 5.7.2 Výpočet molárního toku chladícího vzduchu

$$\dot{Q}_{SP} = \dot{Q}_{CVZ} \quad (5.33)$$

$$\dot{Q}_{SP} = \dot{n}_{SP} \cdot \bar{c}_{p_{SP}} \cdot (T_{SP} - T_{SM}) \quad (5.34)$$

$$\dot{Q}_{CVZ} = \dot{n}_{CVZ} \cdot \bar{c}_{p_{CVZ}} \cdot (T_{SM} - T_{CVZ}) \quad (5.35)$$

Molární tok chladícího vzduchu (po úpravě).

$$\begin{aligned} \dot{n}_{CVZ} &= \frac{\dot{n}_{SP} \cdot \bar{c}_{p_{SP}} \cdot (T_{SP} - T_{SM})}{\bar{c}_{p_{CVZ}} \cdot (T_{SM} - T_{CVZ})} = \frac{33,531 \cdot 30,324 \cdot (580,609 - 423,150)}{29,190 \cdot (423,150 - 293,150)} \\ &= 42,192 \frac{kmol}{h} \end{aligned} \quad (5.36)$$

Složení chladícího vzduchu je stejné, jako složení spalovacího vzduchu. Určení molárního toku jednotlivých složek je vypočteno dle vztahu (5.37).

$$\dot{n}_{i,CVZ} = x_{i,CVZ} \cdot \dot{n}_{CVZ} \quad (5.37)$$

Molární tok sušícího média je dán součtem odpovídajících si složek chladícího vzduchu a vlhkých spalin, rovnice (5.38), následně je vypočten molární (objemový) zlomek dle vztahu (5.39).

$$\dot{n}_{i,SM} = \dot{n}_{i,SP} + \dot{n}_{i,CVZ} \quad (5.38)$$

$$x_{i,SM} = \frac{\dot{n}_{i,SM}}{\dot{n}_{SM}} \quad (5.39)$$

Tab. 13 Chladící vzduch a sušící médium

Složka i	Spaliny z mikroturbíny		Chladící vzduch		Sušící médium	
	[obj. %]	[kmol/h]	[obj. %]	[kmol/h]	[kmol/h]	[obj. %]
N <sub>2</sub>	75,866	25,439	77,059	32,513	57,951	76,531
O <sub>2</sub>	17,232	5,778	20,676	8,724	14,502	19,151
Ar	0,913	0,306	0,928	0,391	0,698	0,921
CO <sub>2</sub>	1,606	0,538	0,030	0,012	0,551	0,728
H <sub>2</sub> O	4,383	1,470	1,307	0,552	2,021	2,669
Celkem	100,000	33,531	100,000	42,192	75,723	100,000

### Střední molární hmotnost sušícího média

$$MW_{SM,stř} = \sum MW_{i,SM} \cdot x_{i,SM} = 28,736 \frac{kg}{kmol} \quad (5.40)$$

Hodnota měrného tepla je vypočtena dle již zmíněného vztahu (5.29), pro zadanou teplotu sušícího média  $T_{SM} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Měrná entalpie, vztažená k 0 °C

$$h_{SM} = \sum \left[ \left( A_i \cdot (T_{SM} - 273,15) + B_i \cdot \frac{T_{SM}^2 - 273,15^2}{2} + C_i \cdot \frac{T_{SM}^3 - 273,15^3}{3} + D_i \cdot \frac{T_{SM}^4 - 273,15^4}{4} + E_i \cdot \left( \frac{1}{273,15} - \frac{1}{T_{SM}} \right) \right) \cdot x_{i,SM} \right] \quad (5.41)$$

$$h_{SM} = 4394,933 \frac{kJ}{kmol}$$

### Volba tlaku sušícího média

Jelikož experiment sušení ochlazenými spalinami z plynové mikroturbíny nebylo možné realizovat, tak tlak na vstupu do sušičky je uvažován pro tuto práci jako tlak normální (101,325 kPa) – sušení probíhá přibližně za atmosférického tlaku. Přesnou hodnotu tlaku by bylo vhodné stanovit měřením s ohledem na tlakové ztráty (např. ve směšovači apod.).

$$p_{SM} = 101,325 \text{ Pa}$$

Hmotnostní a objemový průtok lze určit podle dále uvedených vztahů.

$$\dot{m}_{SM} = \sum \frac{MW_{i,SM} \cdot \dot{n}_{i,SM}}{3600} \quad (5.42)$$

$$\dot{V}_{SM} = \sum \frac{\dot{n}_{i,SM} \cdot 22,414}{3600} \quad (5.43)$$

Relativní vlhkost je vypočtena stejným způsobem, jako vlhkost vlhkého vzduch

Tepelný tok sušícího média je dán součinem hmotnostního průtoku a měrné entalpie.

$$\dot{Q}_{SM} = \dot{m}_{SM} \cdot h_{SM} \quad (5.44)$$

## 5.8 Shrnutí parametrů sušícího média

Parametry jsou vztaženy pro teoretický výkon turbíny 25 kW a požadovanou teplotu 150 °C, která byla zvolena.

Tab. 14 Parametry sušícího média

Složka i	Molární hmotnost [kg/kmol]	Molový průtok [kmol/h]	Složení [obj. %]	Hm. průtok [kg/s]	Stř. mol. hmotnost [kg/kmol]	Teplota [°C]	Měrné teplo [kJ/(kmol·K)]	Měrná entalpie [kJ/kmol]	Tlak [kPa]	Relat. vlhkost [%]	Tepelný tok [kW]
N <sub>2</sub>	28,01	57,95	76,53	0,45	28,74	150,00	29,61	4394,93	101,33	0,57	92,44
O <sub>2</sub>	32,00	14,50	19,15	0,13							
Ar	39,95	0,70	0,92	0,01							
CO <sub>2</sub>	44,01	0,55	0,73	0,01							
H <sub>2</sub> O	18,02	2,02	2,67	0,01							
Celkem		75,72	100	0,60							



## 6 SUŠENÍ V PRADELENSKÉM PROCESU

Tato kapitola je už blíže zaměřena na sušení konkrétního materiálu. Jedná se o prádlo, které se suší v zařízení nazývaném obecně jako sušička prádla. Jako sušící médium jsou použity ochlazené spaliny, které byly definovány v předchozí kapitole. Toto sušící médium už není třeba jakkoliv upravovat.

Sušení prádla následuje po procesu mechanického odvodnění, které probíhá v odvodňovacím lisu nebo v odstředivce. Úkolem je tedy odstranit zbývající vodu z textilie, která nešla odstranit mechanicky. Sušení může probíhat v již zmíněné sušičce, dále ve finišeru oděvů nebo žehlicím zařízení na rovné prádlo.

Sušička je zpravidla zařízení, které je nutné ručně plnit, jedná se tedy o vsádkový provoz, tzn. na jeden cyklus lze vysušit určité množství prádla, na které je sušička navržena. Po dokončení se vysušené prádlo vyjme a je nahrazeno novým mokrým prádlem. Sušička pracuje většinou jako konvekční zařízení, jako sušící médium se nejčastěji používá vzduch nebo spaliny.

Výhody sušiček:

- rychlý a pohodlný způsob sušení
- prádlo je měkčí a rovnější – lépe se žehlí.

Nevýhody:

- vyšší spotřeba energií
- při částečném zatížení neefektivní.

### 6.1 Sušičky v domácnostech

Největší rozmach v posledním desetiletí zažívají sušičky pro domácí použití. Dnešní trend směřuje k úsporám energií i v tomto odvětví, a to se následně odráží na nižších teplotách sušení. Sušičky se vyvinuly z komerčních zařízení, mají omezené napájení a menší kapacitu vsázky prádla.

Jednou z posledních novinek v domácím sušení je patentovaný sušící program, který zahrnuje optimální nastavení parametrů pro dané prádlo. Mezi ně patří zejména sušící teplota, rychlost a směr otáčení bubny. Tento systém vyvinula společnost AEG a nese název AbsoluteCare™. Je optimalizován pro každý druh prádla, zvláště je vhodný pro jemnější materiály. Obr. 19 zachycuje srovnání standartního sušení (vpravo) a sušení pomocí zmíněného systému (vlevo). Je však nutné jej brát s rezervou, jedná se o reklamu výrobce sušičky. [32]



Obr. 19 Srovnání způsobů sušení [33]

## 6.2 Druhy vlhkostí v prádle

Po odstředění v pračce dosahuje měrná vlhkost hodnot 0,3 – 0,7. Tato hodnota závisí nejvíce na otáčkách při odstředování a dále na teplotě při odstředování. V prádelnictví se zavádí pojem relativní vlhkost, jedná se o poměr hmotnosti vody v prádle a suchého prádla.

$$\varphi_{cl} = \frac{m_{H_2O}}{m_{s,cl}} [-; kg_{H_2O}/kg_{s.p.}] \quad (6.1)$$

V laboratorní praxi se označuje za suchý materiál ten, který je podroben sušení při teplotě sušicího média o teplotě 105 °C. Z tohoto materiálu je odstraněna volná vlhkost, ale nedochází k odstranění krystalické vody.

### Adhezní (mechanická)

Tato vlhkost ulpívá na povrchu vláken v prádle, dále ji lze nalézt ve volném prostoru mezi vlákny. Odstraňuje se mechanicky, a to odstředováním nebo ždímáním.

### Kapilární (bobtnací)

Nalézá se ve vnitřních mezimicelárních prostorech vláken. Je možné ji odstranit pomocí sušení.

### Hydrokopická

Vlhkost je přímo úměrná s relativní vlhkostí okolního prostředí, se kterým je v rovnováze. Dále je závislá na teplotě. Odstranit ji lze vypařením, tj. při teplotách nad 100 °C (za atmosférického tlaku).

### Chemicky vázaná

Spolu s vláknem prádla tvoří chemickou sloučeninu. Vzniká vazbou vody a vláken pomocí vodíkových můstků. Odstranění chemicky vázané vlhkosti je nežádoucí – došlo by k výraznému poškození struktury vlákna. [34]

## 6.3 Sušička Primus T24 G

Jedná se o velkokapacitní sušičku, která je umístěna v laboratoři náročných procesů NETME. Jejím výrobcem je společnost Primus.

Prádlo je vkládáno do bubnu, který je vyroben z nerezavějící oceli. Buben je poháněn elektromotorem o příkonu 0,25 kW. Dále je ze zadní části sušárny nasáván vzduch, který pokračuje do prostoru spalování (nachází se v horní části sušárny). Zde je také přípojka pro plyn, který pak postupuje do hořáku. Hořák pracuje v periodickém režimu, v závislosti na výstupní teplotě spalin, které opouštějí sušárnu.

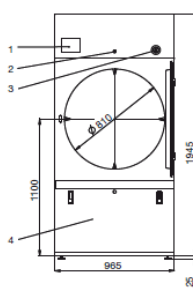
Po spálení plynu postupují spaliny do pracovního prostoru sušárny v radiálním směru (z horní části). Při plném zatížení sušičky se teplota na vstupu do sušárny pohybuje kolem 150 °C. Následně spaliny prochází perforovaným bubnem a po předání tepla a odebrání vlhkosti z prádla postupují do tkaninového filtru, kde jsou od spalin odděleny pevné částice jako například drobné kousky poškozených textilií, chumáče prachu, vlasy a podobně. Část spalin se do bubnu nedostane a buben jen obtečou (bypass).

Následně je vlhké médium odváděno mimo prostor sušárny skrz ventilátor, který je umístěn v dolní části sušičky.

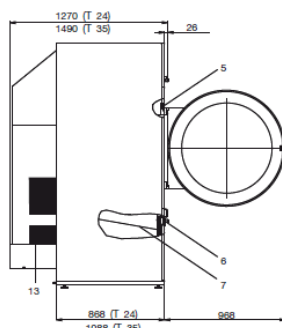
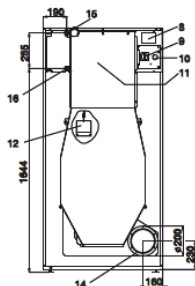
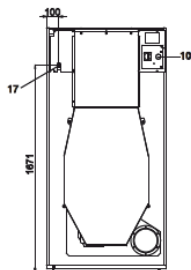
Tab. 15 Parametry sušičky Primus T24 G [35]

Parametr	Jednotka	Hodnota
kapacita bubnu	kg	24
objem / průměr bubnu	l / min	530 / 930
odpařovací kapacita	kg·min <sup>-1</sup>	0,384
druh ohřevu	–	plynový
příkon ohřevu	kW	33
příkon pohonu / ventilátoru	kW	0,25 / 0,55
limit teploty sušení	°C	82
průtok vzduchu	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	900
čistá hmotnost	kg	275
rozměry (V x Š x H)	mm	1975 x 965 x 1270

ZEPŘEDU T 24 35



ZBOKU T 24 35


 ZE ZADU T 24 35  
(PARNÍ MODEL)

 ZE ZADU T 24 35  
(PLYNOVÝ MODEL)


1. Programátor
2. Zámek ovládacího panelu
3. Tlačítko nouzového zastavení
4. Kryt prachového filtru
5. Mikrospínač zámku dveří
6. Mikrospínač krytu prachového filtru
7. Prachový filtr
8. Výrobní štítek
9. Hlavní vypínač
10. Hlavní přívod elektrické energie
11. Topná komora
12. Spínač proudění vzduchu
13. Sání
14. Odvětrání
15. Přívod páry
16. Odvod kondenzátu
17. Připojení plynu

Obr. 20 Popis sušárny T24 G [35]

**Mezi hlavní faktory, které nejvíce ovlivňují proces sušení prádla, patří:**

- teplota vkládaného prádla
- materiál, ze kterého je prádlo vyrobeno
- počáteční vlhkost prádla
- teplota v sušičce
- teplotní ztráty sušičky
- konstrukce sušičky
- promíchávání prádla během sušení
- požadovaná koncová vlhkost
- vlastnosti sušícího média
- teplota, měrné teplo sušícího média

### Faktory, které ovlivňují dobu sušení:

- typ a konstrukce sušárny
- sušící médium
- kontakt sušícího média se sušeným materiálem
- tvar sušené látky (rozměry částic, tloušťka vrstvy)
- volba sušícího média
- vlastnosti sušené látky (struktura a sazba vlhkosti)
- vlhkost sušeného materiálu (vstupní, konečná a kritická).

## 6.4 Kinetika sušení v bubnové sušičce

Sušení v prádlenství je velmi složitý proces, který je plný nahodilých jevů. Matematicky popsat tyto jevy je velmi náročné a zdoluhavé, proto je nezbytné vytvořit si určitá zjednodušení, která příliš výsledky neovlivní.

Model sušičky je nastíněn podle J. Deanse [36], který se zabývá menšími sušičkami pro domácí použití. Toto řešení je bráno z makro pohledu. Dále je v této podkapitole také přihlédnuto k dřívější závěrečné práci [37], postup byl konzultován s jejím autorem.

Předpoklady pro model:

- teplota a průtok sušícího média jsou konstantní
- teplota bubnu, prádla a vody v něm jsou stejné
- rozložení vlhkosti v sušícím médiu je konstantní
- termo-fyzikální vlastnosti prádla jsou rovněž konstantní

### 6.4.1 Přenos tepla

Základním principem je energetická bilance (zákon zachování energie), která platí pro jeden konkrétní bod v čase.

$$E_{in} = E_{out} + E_Z \quad (6.2)$$

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_Z - \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{ac} \quad (6.3)$$

Hlavním dodávaným teplem je sušící médium, které proudí do prostoru bubnu a odvádí vlhkost. Aby ale k samotnému odpaření vlhkosti došlo, je nutné dodat do prádla energii navíc, která zajistí samotné odpaření. Ta je zohledněna v následujícím vztahu.

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_Z - \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{ac} \quad (6.4)$$

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{Q}_{drum} + \dot{Q}_{H_2O} + \dot{Q}_{cl} \quad (6.5)$$

Jednotlivá tepla, která přechází do bubnu, vlhkosti a prádla jsou dána vztahy (6.6) až (6.8).

$$\dot{Q}_{drum} = m_{drum} \cdot c_{p_{drum}} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (6.6)$$

$$\dot{Q}_{H_2O} = m_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (6.7)$$

$$\dot{Q}_{cl} = m_{cl} \cdot c_{p_{cl}} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (6.8)$$

Z výše uvedených předpokladů, rovnic a jejich úpravou lze získat vztah pro okamžitou teplotu prádla.

$$\frac{dT_{cl}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_Z - \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{out}}{m_{drum} \cdot cp_{drum} + m_{H_2O} \cdot cp_{H_2O} + m_{cl} \cdot cp_{cl}} \quad (6.9)$$

V dalším kroku Deans řeší logaritmický vztah mezi vstupní a výstupní teplotou.

$$\frac{T_{out} - T_{cl} - \frac{\dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_Z}{\alpha \cdot A}}{T_{in} - T_{cl} - \frac{\dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_Z}{\alpha \cdot A}} = e^{-\left(\frac{\alpha \cdot A}{\dot{m}_{SM} \cdot cp_{avg}}\right)} \quad (6.10)$$

Vážený průměr měrných tepelných kapacit je vypočten podle dalšího vztahu. Jednotlivé měrné tepelné kapacity jsou funkcemi teplot.

$$cp_{avg} = \frac{m_{drum} \cdot cp_{drum} + m_{H_2O} \cdot cp_{H_2O} + m_{cl} \cdot cp_{cl}}{m_{drum} + m_{H_2O} + m_{cl}} \quad (6.11)$$

Teplota fázového rozhraní sušící médium – prádlo je určena jako průměr teploty prádla a sušícího média.

$$T_f = \frac{T_{SM} + T_{cl}}{2} \quad (6.12)$$

#### 6.4.2 Přenos hmoty

Následující rovnice vystihuje úbytek vlhkosti ze sušeného prádla a nárůst vlhkosti v sušícím médiu. Rovnice je linearizována, protože změna vlhkosti při průchodu sušícího média bubnem je poměrně malá.

$$\dot{m}_{evap} \cdot (x_{in} - x_{out}) = k \cdot A \cdot \left( a \cdot x_f - \frac{x_{in} + x_{out}}{2} \right) \quad (6.13)$$

Koeficient aktivity.

$$a = 1 - \frac{\beta \cdot X + \delta}{1 + \delta \gamma \cdot X} \quad (6.14)$$

Vlhkost obsažená v prádle.

$$X = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{wet}} \quad (6.15)$$

Hodnota vlhkosti na rozhraní mezi sušícím médiem a sušeným materiálem – toto rozhraní je považováno za saturované.

$$x_f = 0,662 \cdot \frac{p_{sat}}{p_{atm} - p_{sat}} \quad (6.16)$$

Saturační tlak je funkcí teploty fázového rozhraní.

$$p_{sat} = \frac{1}{T_f^{8,2}} \cdot e^{77,345 + 0,0057 \cdot T_f - 7235 \cdot T_f^{-1}} \quad (6.17)$$

Následující dva vztahy slouží k výpočtu hydraulického průměru a Reynoldsova čísla.

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{o} = 2 \cdot \frac{h \cdot l}{h + l} \quad (6.18)$$

$$Re = \frac{V \cdot D_h \cdot \rho_{SM}(T_{SM})}{S \cdot \eta_{SM}(T_f)} \quad (6.19)$$

Pomocí Nusseltova čísla v dalším vztahu je později určen součinitel přestupu tepla, jedná se o radiální tok kolem statického válce.

$$\overline{Nu}_D = 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re_D^{0,5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + (0,4 \cdot Pr^{-1})^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \cdot \left(1 + \left(\frac{Re_D}{2,82 \cdot 10^5}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}} \quad (6.20)$$

Součinitel přestupu tepla.

$$\bar{\alpha} = \frac{\overline{Nu}_D \cdot \lambda_{SM}(T_f)}{D_{drum}} \quad (6.21)$$

Lewisovo číslo slouží pro výpočet součinitele přestupu hmoty.

$$Le = \frac{\lambda_{SM}(T_f)}{\rho_{SM} \cdot cp_{SM}(T_f) \cdot D(T_f)} \quad (6.22)$$

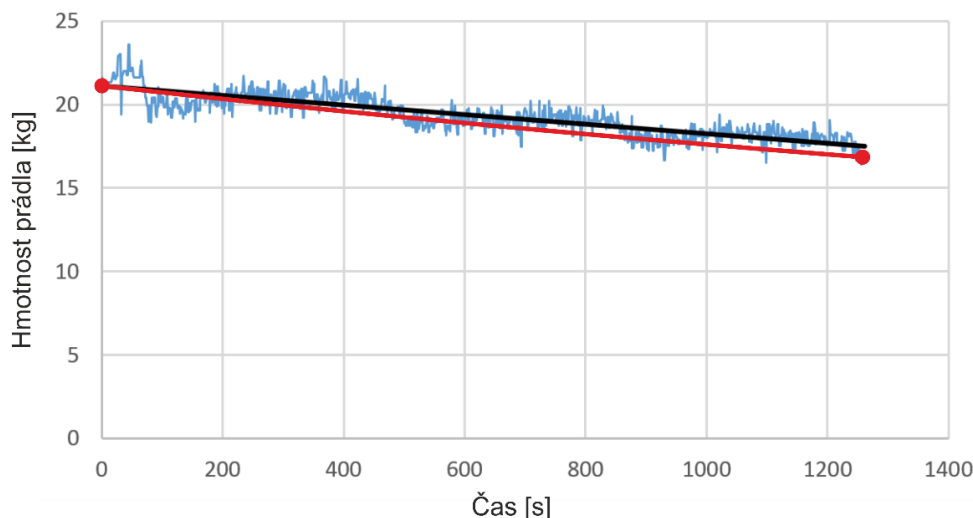
Difuzní součinitel potřebný pro řešení Lewisova čísla. Jde o polynomický rozvoj teploty fázového rozhraní.

$$D = -2,775 \cdot 10^{-6} + 4,479 \cdot 10^{-8} \cdot T_f + 1,656 \cdot 10^{-10} \cdot T_f^2 \quad (6.23)$$

Vztah pro určení součinitele přestupu hmoty.

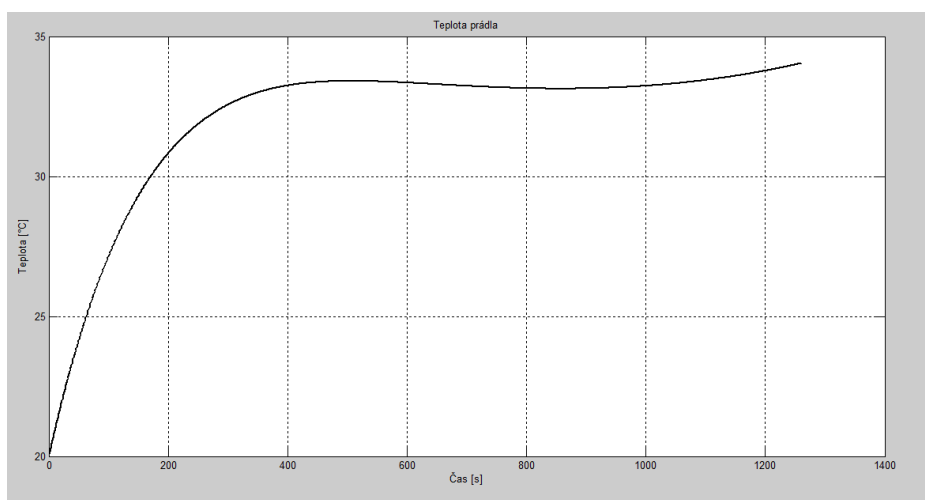
$$k = \frac{\bar{\alpha}}{\rho_{SM} \cdot cp_{SM} \cdot Le^{\frac{2}{3}}} \quad (6.24)$$

## 6.5 Sloučení modelu a experimentu



Obr. 21 Úbytek hmotnosti prádla

Na Obr. 21 je srovnání výpočtového modelu podle Deanse a provedeného experimentu, převzato z [37]. Modrá linka zobrazuje naměřené hodnoty z průběhu experimentu. Jedná se o úbytek hmotnosti v podobě vlhkosti na čase. Tyto data jsou aproximována přímkou (černá), která vystihuje mírný pokles. Poslední proměnou na obrázku je výpočet dle Deanse (červená). Tento průběh má přibližně lineární charakter, který je dán rovnicí (6.13). Nelinearita je způsobena hodnotou přestupu hmoty a ostatních závislých proměnných, které se v průběhu času nepatrně mění.



Obr. 22 Průběh teploty prádla na čase

Z průběhu závislosti teploty prádla na čase (Obr. 22) je zřejmé, že model přibližně vystihuje teoretický průběh. Prádlo je zpočátku ohříváno a po určité době se jeho hodnota ustálí. V této fázi dochází k hlavní části sušení a energie v sušicím médiu je využívána právě k vypařování vlhkosti z prádla. Teplota kolísá jen minimálně.



## 7 ZÁVĚR

Jedním z hlavních výstupů této práce jsou spaliny z plynové mikroturbíny ochlazené na požadovanou teplotu. A to z důvodu, že každý materiál je vhodné sušit jinou teplotou, aby nedošlo k jeho případnému poškození vlivem vysokých hodnot. Výpočtový model je takto vhodný pro univerzální použití v širokém spektru sušících zařízení. Mezi vypočtené parametry sušícího média patří jeho entalpie, vlhkost, tepelný tok a případně složení. Stechiometrické spalování je pro bilanční výpočty dostačující, průtočné množství spalin se příliš nelišilo od hodnot naměřených, byly však nepatrně menší. To může být způsobeno výskytem jiných prvků a reakcí, které nejsou do stochiometrického spalování zahrnuty. Co se týká provozu plynové mikroturbíny – je bez pochyby nutné, aby pracovala v režimu, který zajistí co nejkratší návratnost investice. Režimem je uvažováno nastavení elektrického výkonu. Jako nejvýhodnější se tak jeví jeho maximální hodnota. Nižší výkon znamená menší elektrický a tepelný zisk a v konečném důsledku to může znamenat méně usušeného materiálu. Avšak i zde hraje opět velmi důležitou roli výše zmíněná teplota. Protože pokud sušíme při nižších teplotách, tak je chladicího vzduchu přiváděno více a v konečném důsledku je tak získáno větší množství sušícího média. Dalším významným faktorem pro tento předpoklad je taktéž vlhkost sušeného materiálu a jeho schopnost tuto vlhkost zadržovat. Pro tyto předpoklady je nezbytné provést optimalizaci, která povede k nalezení vhodného zvolení výše zmíněných skutečností.

Nevýhodou provozu plynové mikroturbíny je vyšší hlučnost a nutnost zajistit dostatečné množství sušeného materiálu, který zajistí pokud možno nepřetržitý provoz s minimálním množstvím odstávek. Jedině tak se zajistí výhodný ekonomický provoz. Současně musí být také vyřešena problematika odběru elektrické energie. Z toho plyne, že sušení je spíše vhodné pro větší kapacity s ohledem na fakt, že investovat do mikroturbíny zřejmě nebude menší firma, protože zde hrají investiční náklady hlavní roli. Navíc mikroturbíny nejsou ještě příliš rozšířené a pohled na ně je zatím brán s mírným odstupem.

Dalším výstupem je bilanční model, který zahrnuje vstupní a výstupní parametry jak sušeného materiálu, tak sušícího média. Jedná se o entalpii, vlhkost a hmotnostní průtok. Pohled na sušičku je uvažován, jako by byla „black box“.

V poslední fázi je řešena problematika sušení na konkrétním zařízení, a to na sušičce Primus T24 G. Jejím výstupem vyobrazení závislosti úbytku vlhkosti na čase a jeho srovnání s experimentem. Z výpočtů je zřejmé, že plynová mikroturbína dodává více tepla, než potřebuje sušička Primus T24 G. Příkon jejího hořáku je 37 kW. Tudíž výhodné zapojení plynové mikroturbíny a této sušičky nelze uvažovat, protože takový provoz by se jevil neefektivně. To platí s přihlédnutím na maximální provoz plynové mikroturbíny, která po ochlazení na teplotu 150 °C produkuje necelých 1700 m<sup>3</sup>/h sušícího média, sušičce je dodáváno 900 m<sup>3</sup>/h. Dalším záporným faktem je skutečnost, že na výstupu ze sušičky je umístěno teplotní čidlo, které sleduje výstupní teplotu a ta je uživatelem nastavená. Pokud dojde k její překročení, plynový hořák je vypnut. Hořák tak funguje v režimu, kdy je zapnut nebo vypnut, jiným způsobem ho regulovat nelze. Z toho plyne, že pro případné zapojení by bylo nutné zasáhnout nejen do konstrukční oblasti, ale také do softwarové.

Nicméně pokud by bylo uvažováno zapojení plynové mikroturbíny a sušičky na prádlo, bylo by nutné turbínu provozovat na minimální výkon. Po ochlazení spalin na teplotu 150 °C by bylo k dispozici 903 m<sup>3</sup>/h sušícího média o tepelném výkonu 49 kW.



Tato diplomová práce by mohla být podmětem pro další zjišťování vhodnosti spalín z mikroturbíny pro sušení. Nabízí se celá řada námětů pro řešení:

- ekonomické srovnání spalín z mikroturbíny a ohřevu vzduchu pomocí elektrického proudu (pro stejný tepelný tok sušícího média)
- konstrukční návrh směšovače spaliny – vzduch
- aplikace spalín pro jiné typy sušáren a sušených materiálů.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Popis	Jednotka
A	plocha	$m^2$
a	koeficient aktivity	–
$C_p$	měrné teplo	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
D	difuzní koeficient	$m^2 \cdot s^{-1}$
$D_h$	hydraulický průměr	m
E	energie	J
h	entalpie; šířka	$J \cdot mol^{-1}$ ; m
k	součinitel přestupu hmoty	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
l	délka	m
Le	Lewisovo číslo	–
m	hmotnost	kg
$\dot{m}$	hmotnostní tok	$kg \cdot s^{-1}$
MW	molární hmotnost	$kg \cdot mol^{-1}$
n	molové množství	mol
$\dot{n}$	molový tok	$mol \cdot s^{-1}$
$n_{h,O_2}$	počet naměřených hodnot kyslíku	–
$n_{h,t}$	počet naměřených teplot teploty	–
$Nu_D$	Nusseltovo číslo	–
o	obvod	m
p	tlak	Pa
$p^{\text{cc}}$	tlak nasycených par	Pa
Pr	Prandtlovo číslo	–
$\dot{Q}$	tepelný tok	W
Re	Reynoldsovo číslo	–
S	stechiometrický koeficient; plocha	–; $m^2$
t	teplota	$^{\circ}C$
T	teplota	K
$t_{\text{cas}}$	časový úsek	s
V	objem	$m^3$
$\dot{V}$	objemový průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
X	měrná vlhkost	–
x	molární zlomek	–
Y	absolutní vlhkost	–

Řecký symbol	Popis	Jednotka
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$\beta$	koeficient materiálu prádla	–
$\delta$	koeficient materiálu prádla	–
$\eta$	dynamická viskozita	Pa · s
$\lambda$	tepelná vodivost	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

$\rho$	hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\Upsilon$	koeficient materiálu prádla	–
$\phi$	relativní vlhkost	–

## Dolní index

## Popis

1	počátek úseku; vztaženo na 1 kmol
2	konec úseku
ABS	absolutní
ac	akumulace
atm	atmosféra
avg	průměr
cl	prádlo
CVZ	chladicí vzduch
drum	buben
dry	suché prádlo
evap	odpaření
EX	experiment
f	fázové rozhraní
i	patříčná složka
in	vstup
loss	ztráta
M	sušený materiál
NP	normální podmínky
out	výstup
P	přídavek
p	přebytek
PP	přetlak v potrubí
s	suchý (vzduch; spaliny)
sat	saturace
SM	sušící médium
SP	spaliny
SPVZ	spalovací vzduch
stř	střední
v	vlhký (vzduch; spaliny)
wet	voda v prádle
Z	ztráty
ZP	zemní plyn
$\alpha$	bez přebytku

## Chemické prvky a sloučeniny

## Název

Ar	argon
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	etan

$C_3H_8$	propan
$C_4H_{10}$	iso-butan; n-butan
$C_5H_{12}$	iso-pentan; n-pentan
$C_6H_{14}$	hexan
$CO_2$	oxid uhličitý
$H_2O$	voda
$CH_4$	metan
$N_2$	dusík
$O_2$	kyslík

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

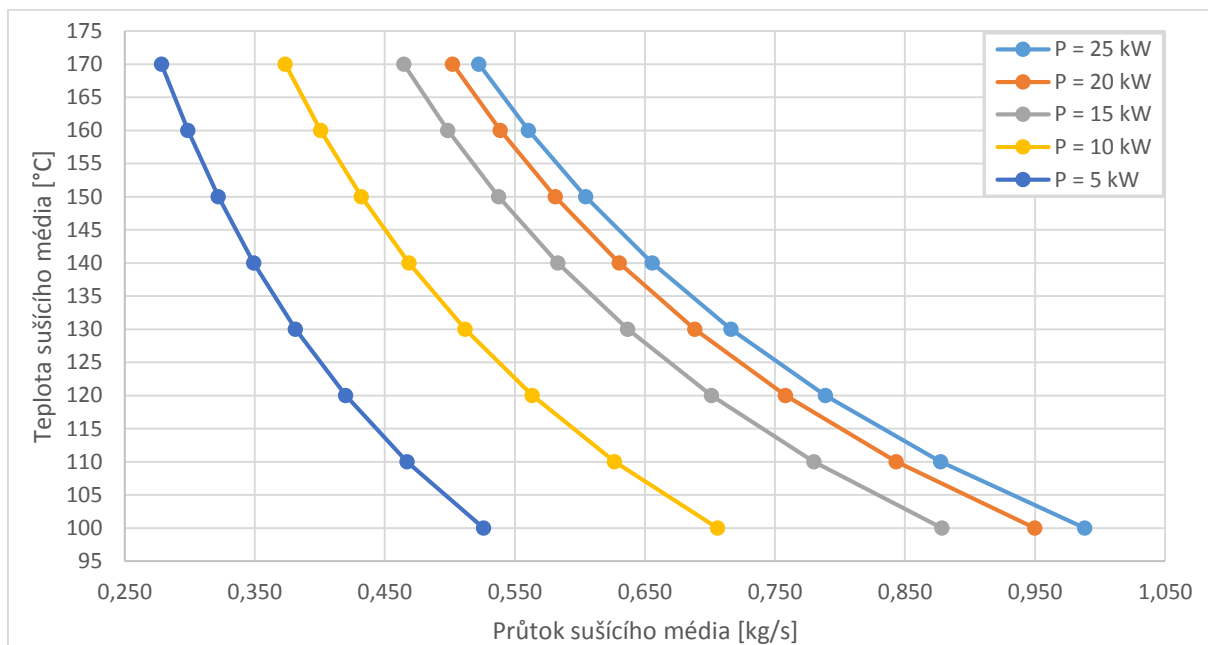
- [1] ŠESTÁK, Jiří a Rudolf ŽITNÝ. Tepelné pochody. II, Výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 165 s. : il., grafy, tabulky. ISBN 80-01-01630-7.
- [2] PILAŘ, Antonín, Ivan MACHAČ a Jaroslav NÝVLT. Chemické inženýrství: Díl III. Difúzní operace. 1. vyd. Praha: SNTL, 1972, 340 s.
- [3] MÍKA, Vladimír. Základní vztahy v chemickém inženýrství II: Difuzní pochody. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968, 210 s.
- [4] Měření vlhkosti vzduchu. [online]. 2014 [cit. 2015-05-16]. Dostupné <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/x34ses/cviceni/Navody%20na%20cviceni/07.Mereni%20vlhkosti.pdf>.
- [5] TSOTSAS, Evangelos a A MUJUMDAR. Modern drying technology. Weinheim: Wiley-VCH, 2007, xxxvii, 320 s. ISBN 978-3-527-31556-71.
- [6] JÍCHA, Jaroslav. Brno, 2014, 21 stran. Prezentace z předmětu Difuzní pochody. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: síťový disk ÚPEI.
- [7] Aspirační psychrometr. [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmr/Images/psychrometr.gif>.
- [8] GRDZELIŠVILI G.: Sušení rostlinných materiálů. Brno, 20 s. Školitel Doc. Ing. Pavel Hoffman.
- [9] Sušení. [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://lat.zshk.cz/vyuka/suseni.aspx>
- [10] LAC, s.r.o.: Laboratorní pece a sušárny. [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: [http://www.lac.cz/doc/Katalogy\\_Letaky/LAC-laboratorni\\_pece\\_a\\_susarny\\_CZ.pdf](http://www.lac.cz/doc/Katalogy_Letaky/LAC-laboratorni_pece_a_susarny_CZ.pdf).
- [11] LAC, s.r.o.: SVK 50000/03. [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: [http://www.lac.cz/img/SVK\\_50000.jpg](http://www.lac.cz/img/SVK_50000.jpg).
- [12] Pásová sušárna. [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: [http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Bara/postupy\\_soubory/pasova\\_susarna.png](http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Bara/postupy_soubory/pasova_susarna.png).
- [13] Fluidní sušárna. [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: [http://www.kurimoto.co.jp/worldwide/en/product/product/image/ContinuousFluidBedDryingSystem\\_Fig-4.gif](http://www.kurimoto.co.jp/worldwide/en/product/product/image/ContinuousFluidBedDryingSystem_Fig-4.gif).
- [14] Rotační sušárna. [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://feeco.feecointernation.netdna-cdn.com/wp-content/uploads/2012/07/ROTARY-DRUM-ANATOMY.jpg>.
- [15] Rozprašovací sušárna. [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: [http://lat.zshk.cz/media.aspx?id=SLT033&TB\\_iframe=true&height=750&width=820](http://lat.zshk.cz/media.aspx?id=SLT033&TB_iframe=true&height=750&width=820).
- [16] Vakuová sušárna. [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://www.labicom.cz/administrace/ckfinder/userfiles/images/Binder%20Vacuum-VDL.jpg>.

- [17] Válcová sušárna. [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: [http://lat.zshk.cz/media.aspx?id=SLT032&TB\\_iframe=true&height=750&width=820](http://lat.zshk.cz/media.aspx?id=SLT032&TB_iframe=true&height=750&width=820).
- [18] ŠUROVSKÝ, Jan. Spalovací turbíny, Praha, 2013, 245 s. ISBN: 978-80-260-4106-1.
- [19] GGC Energy. [online]. 2014 [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: <http://www.ggcenergy.cz/produkty>.
- [20] SOARES, Claire. Microturbines. Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2007, xxix, 271 p. ISBN 07-506-8469-0.
- [21] Popis mikroturbíny. [online]. [cit. 2015-03-05]. Dostupné z: <http://ggcenergy.cz/produkty#c30>.
- [22] Kogenerace. [online]. 2010 [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: <http://www.kogesta.cz/kogenerace.php>.
- [23] Capstone C30. [online]. 2010 [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: <http://ggcenergy.cz/uploaded/Download/soubory/C30.pdf>.
- [24] KOCOUREK, Vladimír. Úvod do potravinářské legislativy. [online]. 2012 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: [http://web.vscht.cz/~kocourev/files/Leg\\_SBP\\_3\\_W.pdf](http://web.vscht.cz/~kocourev/files/Leg_SBP_3_W.pdf).
- [25] Přehled právních předpisů EU [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: [http://europa.eu/legislation\\_summaries/food\\_safety/contamination\\_environmental\\_factors/121290\\_cs.htm#Amendingact](http://europa.eu/legislation_summaries/food_safety/contamination_environmental_factors/121290_cs.htm#Amendingact).
- [26] Polycyklické aromatické uhlovodíky. [online]. [cit. 2015-02-23]. Dostupné z: <http://www.bezpecnostpotravin.cz/az/termin/76519.aspx>.
- [27] Vznik polycyklických aromatických uhlovodíků. [online]. 2004 [cit. 2015-02-23]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1808-vznik-polycyklickych-aromatickych-uhlovodiku>.
- [28] MARTINEK, Václav a Pavel FILIP. Mlynářská technologie 2 [online]. Pelhřimov: Nová tiskárna Pelhřimov s.r.o., 2012 [cit. 2015-02-23]. ISBN 978-80-239-9475-9. Dostupné z: [http://www.svazmlynucr.cz/wp-content/uploads/2014/05/MLYNARSKA-TECHNOLOGIE-2\\_2014.pdf](http://www.svazmlynucr.cz/wp-content/uploads/2014/05/MLYNARSKA-TECHNOLOGIE-2_2014.pdf).
- [29] Bio-info [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.bio-info.cz/zpravy/unikatni-mlyn-ve-starem-meste-pod-sneznikem-mele-cerstve-bio>.
- [30] Distribuční soustava – síť JMK. [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: [https://www.rwe-distribuce.cz/media/images/mapy/mapa\\_JMPNet.pdf](https://www.rwe-distribuce.cz/media/images/mapy/mapa_JMPNet.pdf).
- [31] Kvalita plynu. [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: <http://www.rwe-distribuce.cz/cs/kvalita-plynu/jmp>.
- [32] AbsoluteCare. [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.aeg.nl/plan-design/absolute-care>.
- [33] AEG T77685IH3. [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.hvidevaregrossisten.dk/aeg-t77685ih3.html>.

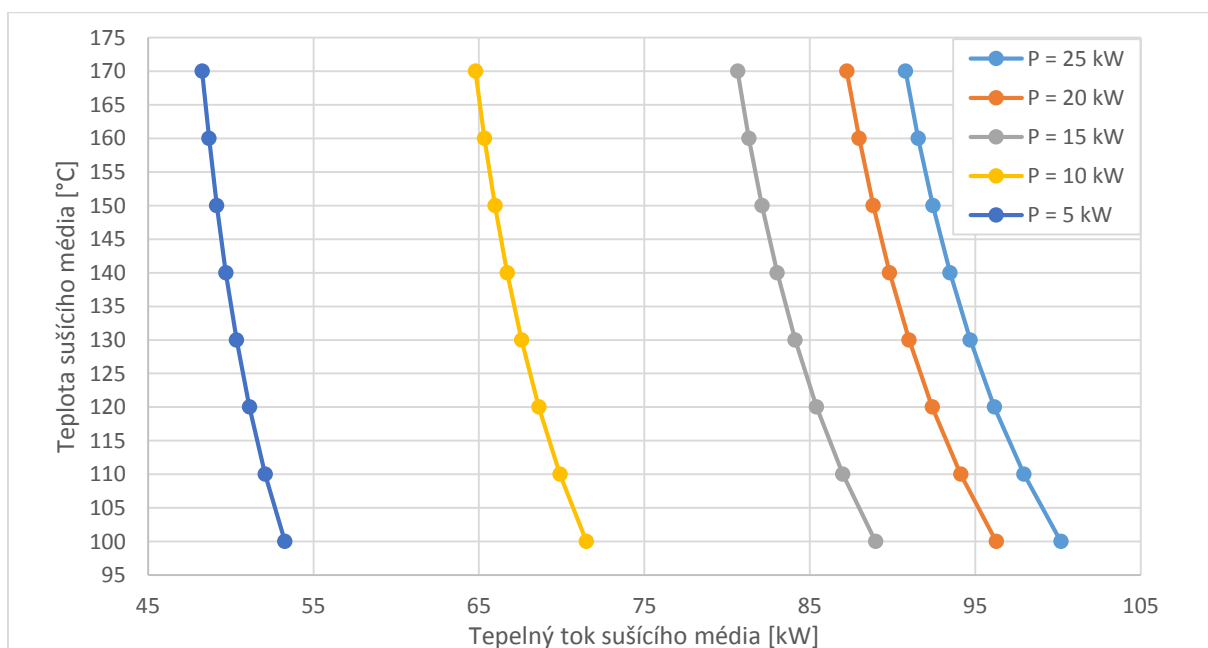
- [34] TĚTHAL, J. Návrh měření na průmyslové pračce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Kuba.
- [35] Průmyslové bubnové sušiče T 24, T 35. Technická specifikace produktů. Primus CE. Online [cit. 4. 4. 2014] dostupné z [http://www.primuslaundry.com/\\_media/primus-386af492637d5d212ad7a8a638112886/techspecs\\_t24\\_35\\_cz.pdf](http://www.primuslaundry.com/_media/primus-386af492637d5d212ad7a8a638112886/techspecs_t24_35_cz.pdf).
- [36] DEANS, J. The modelling of a domestic tumbler dryer. Applied Thermal Engineering, Vol. 21, Issue 9, June 2001, Pages 977-990. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431100000922>.
- [37] DOHNAL, M. Výpočtová analýza proudění v bubnové sušičce prádla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 94 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Hájek, Ph.D.

## 10 PŘÍLOHA

Závislost vybraných teplot na průtoku sušícího média pro jednotlivé výkony plynové mikroturbíny. Platí pro spalovací a chladící vzduch o teplotě 20 °C, tlaku 98 kPa a relativní vlhkosti 55 %.

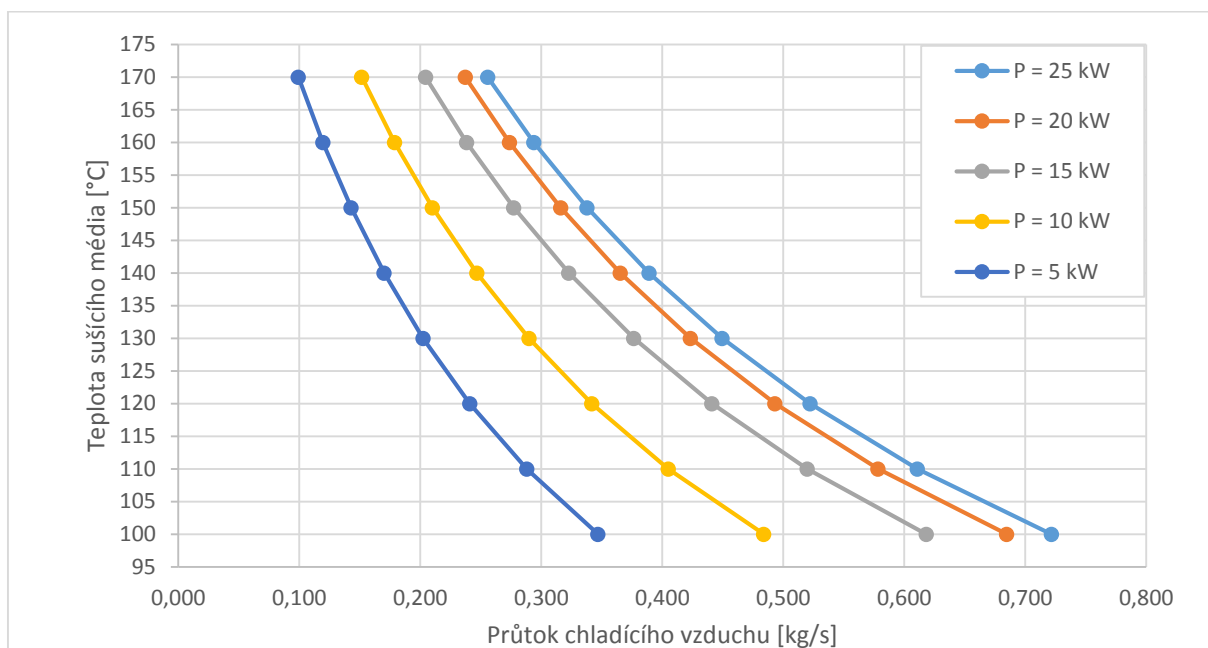


Závislost vybraných teplot na tepelném toku sušícího média pro jednotlivé výkony plynové mikroturbíny. Platí pro spalovací a chladící vzduch o teplotě 20 °C, tlaku 98 kPa a relativní vlhkosti 55 %.

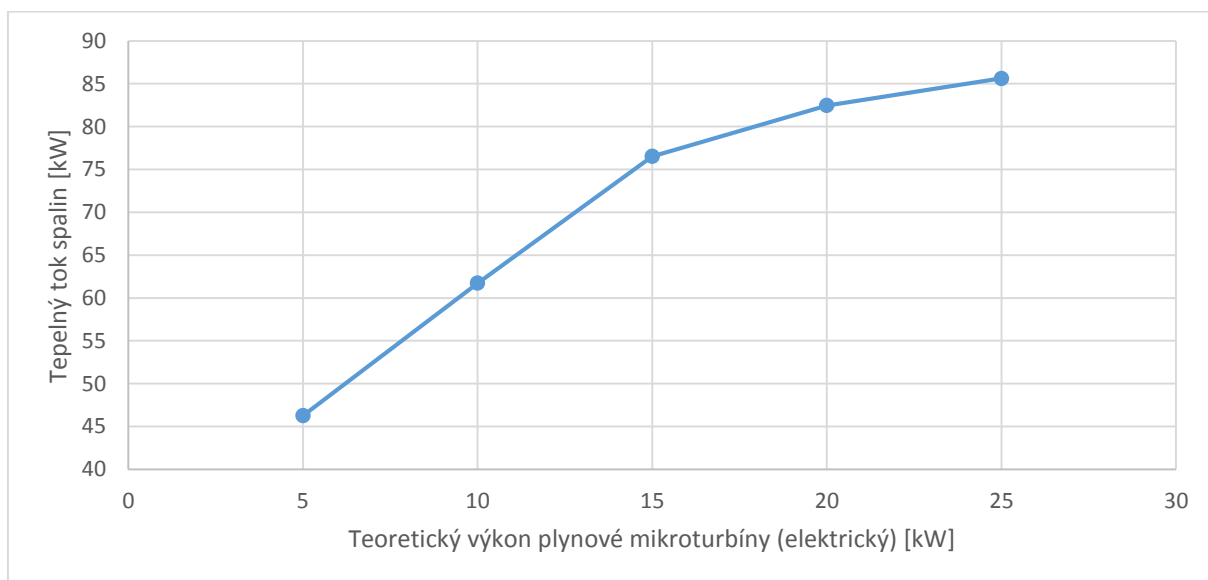




Závislost vybraných teplot na průtoku chladícího média pro jednotlivé výkony plynové mikroturbíny. Platí pro spalovací a chladící vzduch o teplotě 20 °C, tlaku 98 kPa a relativní vlhkosti 55 %.



Závislost tepelného toku spalin z plynové mikroturbíny na jejím výkonu.



Závislost hmotnostního průtoku spalin z plynové mikroturbíny na jejím výkonu.

