

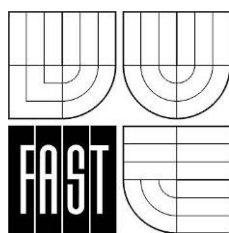
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

LENKA NEVŘIVOVÁ

TECHNICKÁ TERMODYNAMIKA

MODUL BJ11 M06

SUŠENÍ



STUDIJNÍ OPORY
PRO STUDIJNÍ PROGRAMY S KOMBINOVANOU FORMOU STUDIA



OBSAH

1 Úvod	5
1.1 Cíle.....	5
1.2 Požadované znalosti.....	5
1.3 Doba potřebná ke studiu.....	5
1.4 Klíčová slova.....	5
2 Sušení	7
2.1 Rozdělení sušících způsobů a sušáren.....	7
2.2 Sdílení tepla a přenos hmoty při odpařování.....	9
2.3 Sušení při konstantních podmínkách.....	9
2.3.1 Úsek konstantní rychlosti sušení.....	10
2.3.1.1 Způsoby zvyšování přestupu tepla i přenosu hmoty v úseku konstantní rychlosti sušení.....	12
2.3.2 Úsek klesající rychlosti sušení.....	13
2.4 Výpočet sušáren.....	13
2.4.1 Spotřeba vzduchu a tepla v teoretické sušárně.....	15
2.4.2 Tepelná bilance teoretické sušárny.....	17
2.4.3 Spotřeba vzduchu a tepla ve skutečné sušárně.....	17
2.4.4 Sestrojení skutečného procesu sušení v i-x diagramu.....	18
2.4.5 Různé druhy pochodů sušení.....	22
2.4.5.1 Sušárna s recirkulací vzduchu.....	22
2.4.5.2 Sušárna s meziohřevem vzduchu.....	23
2.4.5.3 Sušení kouřovými plyny.....	25
2.4.6 Pohyb vzduchu v sušárně.....	29
2.5 Autotest.....	32
3 Sušárny	33
3.1 Sušárny surovin.....	33
3.1.1 Bubnová sušárna.....	33
3.1.2 Pásová sušárna.....	34
3.1.3 Fluidizační sušárny.....	37
3.1.4 Proudové sušárny.....	38
3.1.5 Rozprachové sušárny.....	39
3.1.5.1 Způsoby rozprašování.....	40
3.1.5.2 Sušení materiálu.....	41
3.1.5.3 Odlučování prášku od sušícího plynu.....	41
3.2 Sušárny výrobků.....	42
3.2.1 Sušárny přírodní.....	43
3.2.2 Sušárny umělé.....	44
3.2.2.1 Kellerova komorová sušárna.....	44
3.2.2.2 Buhrerova komorová sušárna.....	44
3.2.2.3 Geigerova komorová sušárna.....	45
3.2.2.4 Dannenbergova komorové sušárna.....	45
3.2.2.5 Altnerova komorová sušárna.....	45

3.2.2.6	Komorová sušárna dle Ing.Běťáka	47
3.2.2.7	Komorová reverzační sušárna	47
3.2.2.8	Komorová reverzační sušárna s otočným ventilátorem	48
3.2.2.9	Komorová sušárna s rotomixery	49
3.2.2.10	Kanálová (tunelová) průjezdná sušárna	50
3.2.2.11	Kanálová sušárna s rotomixery	52
4	Závěr	55
4.1	Shrnutí	55
4.2	Studijní prameny	55
4.2.1	Seznam použité literatury	55
4.2.2	Odkazy na další studijní zdroje a prameny	56
4.3	Klíč	56

1 Úvod

1.1 Cíle

Cílem předkládaného učebního textu je čtenáře podrobně seznámit s procesem sušení, především při výrobě stavebních hmot. Ukážeme si, jak využít znalosti termodynamiky vlhkého vzduchu (Modul 05) při technologickém sušení. Sušení je jeden z nejdůležitějších technologických kroků při výrobě maltovin, při výrobě keramických surovin, při výrobě stavební a žárovzdorné keramiky. Po pochopení tohoto studijního textu budeme schopni sestavit materiálovou a tepelnou bilanci teoretické sušárny a budeme vědět jaké typy sušáren se ve stavební praxi používají.



1.2 Požadované znalosti

Předložený text je úzce specializovaný studijní materiál, který předpokládá znalost chování vlhkého vzduchu (Modul 05) a základní znalost fyziky a matematiky odpovídající rozsahu absolvovaného bakalářského studia. Pokud se v textu vyskytnou skutečnosti, výrazy či matematické vztahy, které studentovi nejsou zcela známé, doporučuji danou problematiku dohledat v doporučené literatuře.



1.3 Doba potřebná ke studiu

Text tohoto modulu je doprovázen celou řadou názorných grafů, uvedené symboly jsou vždy vysvětleny, sledované procesy jsou v grafech zakresleny a písemně popsány. Vzhledem k tomu pevně věřím, že text bude nejen čitelný, ale i čtivý a snadno pochopitelný a předpokládám, že pro studium postačí maximálně půl dne.



1.4 Klíčová slova

Vlhký vzduch, sušení, sušení kouřovými plyny, vícestupňová sušárna, sušárny, tepelná bilance, materiálová bilance.



2 Sušení

Sušení je technologický proces při němž odstraňujeme nebo snižujeme vlhkost materiálu účinkem tepla na takovou vlhkost, která je vhodná pro další zpracování materiálu či polotovaru. Změna vlhkosti způsobuje změnu stavu látky, což se projevuje ve změně jejich vlastností.



Materiál lze sušit přirozeným nebo umělým způsobem.

Přirozené sušení je nejstarší způsob odstraňování vody z hmoty. Voda se na jejím povrchu odpařuje a pára difunduje do okolního vzduchu. Nároky na energii nejsou prakticky žádné. Na první pohled by se mohlo zdát, že tento způsob sušení je vysoce ekonomický. Avšak při průmyslové výrobě, kdy je prvořadým požadavkem množství usušeného materiálu (či zboží) za jednotku času, projeví se jeho nevýhoda - malá rychlost sušení. Dlouhý čas potřebný pro sušení je příčinou potřeby velkých prostorů a ploch, které zvyšují nejen investiční náklady, ale i náklady na dopravu a manipulaci.

Z tohoto pohledu je výhodnost přirozeného sušení sporná. Proto se používá pro různé druhy hmot a zboží umělého sušení v sušárnách. Výhody plynoucí z úspory místa, snížení zásob a zrychlení výrobního procesu převažují nad náklady vynaloženými na energii.

Umělé sušení se provádí ve speciálním zařízení - sušárně. Při sušení probíhají současně dva základní pochody.

Sdílení tepla pro přeměnu kapaliny (vody) v páru a přenos hmoty - vodní páry z povrchu sušené látky mezní vrstvou do okolního sušícího prostředí. Fyzikální podmínky se v průběhu sušení většinou mění, proto jsou poměry při sušení značně komplikované.

Ke stanovení nejvýhodnějších podmínek sušení je třeba znát fyzikální zákony, které sušení v jeho jednotlivých fázích ovlivňují. Jedině tak lze nejen navrhnout nejvýhodnější typ sušárny, ale také ji provozovat s co nejvyšší účinností.

2.1 Rozdělení sušících způsobů a sušáren

Sušárny mohou pracovat podle rozličných sušících způsobů, kterým je přizpůsobeno konstrukční řešení sušárny.

Sušící způsoby lze rozdělit dle:

- Druhu použitého sušícího prostředí
- Provozního tlaku sušícího prostředí
- Sdílení tepla vysoušenému materiálu
- Proudění sušícího prostředí kolem vysoušeného materiálu
- Povahy provozu
- Pohybu vysoušeného zboží během provozu

Rozdělení dle sušícího prostředí:

- Sušení teplým vzduchem - teplovzdušná sušárna
- Sušení spalinami - spalinová sušárna

Rozdělení dle provozního tlaku:

- Sušení při atmosférickém tlaku - atmosférická sušárna
- Sušení ve vakuu - vakuová sušárna
- Sušení za přetlaku - přetlaková sušárna
- Pulzační sušení při atmosférickém tlaku - pulzační či rytmická sušárna

Rozdělení dle sdílení tepla:

- Konvekční sušení (přímé) - konvekční sušárna
- Kontaktní sušení (nepřímé) - kontaktní sušárna
- Sálavé sušení - sálavá sušárna
- Odporové elektrické sušení - odporová sušárna
- Dielektrické sušení - dielektrická sušárna

Rozdělení dle způsobu proudění sušícího prostředí

- Sušení ofukováním
- Sušení profukováním
- Sušení s impaktním prouděním (kolmo na povrch zboží)
- Sušení v proudu
- Sušení fluidizační

Rozdělení dle povahy provozu

1. Periodická sušárna
2. Kontinuální sušárna
 - souproudová
 - protiproudová
 - křížoproudová

Dle pohybu vysoušeného zboží

1. Materiál při sušení je v klidu
 - Komorová - skříňová sušárna
 - Roštová sušárna

2. Zdrojem pohybu je kinetická energie sušícího prostředí

- Rozprachová sušárna
- Proudová sušárna
- Fluidizační sušárna

3. Pohyb materiálu je obstaráván dopravním zařízením

- Vozíková sušárna
- Válečková sušárna
- Pásová sušárna
- Válcová sušárna
- Bubnová sušárna

2.2 Sdílení tepla a přenos hmoty při odpařování

Proudí-li plyn podél hladiny kapaliny, vytvoří se mezní vrstva, která obsahuje směs páry a plynu a to za předpokladu, že při používaných teplotách plyn nekondenzuje a v kapalině je prakticky nerozpustný.

Bezprostředně u hladiny dosáhne pára meze sytosti, dané výší mezní teploty, která se na hladině vytvořila a je stejná pro přitékající plyn i kapalinu. V důsledku koncentračního spádu v mezní vrstvičce difunduje pára z hladiny kapaliny do plynu, při kterém se stav sytosti na hladině udržuje dodatečným odpařováním kapaliny.

Tento proces se nazývá odpařování. Tlak páry kapaliny nad hladinou nebo nad mokřým povrchem látky je nižší než tlak okolního plynu. Tím se odpařování odlišuje od varu, přičemž je tlak nasycené páry nad kapalinou vyrovnán s tlakem okolí.

Vyjádríme-li průběh sušení pomocí Mollierova i - x diagramu pro vlhký vzduch, je proces jasný po stránce termodynamické, nelze však určit jeho časový průběh. Dobu sušení lze určit stanovením rychlosti přenosu hmoty. Tato rychlost závisí jak na koncentračním spádu, tak i na součiniteli přestupu tepla.

Odpařování je charakterizováno současným přestupem tepla i hmoty. Pokud jde o sušení konvekční, přenáší se teplo z proudícího sušícího media (nejčastěji vzduchu, nebo směsi vzduchu a kouřových plynů) na hladinu vypařující se kapaliny, nebo na vlhký povrch sušeného tělesa, přičemž současně určitá část vlhkosti přechází do plynu jako pára.

2.3 Sušení při konstantních podmínkách

Vodu, kterou je třeba z materiálu odstranit při sušení je možno rozdělit do dvou skupin a to na vodu volnou a na vodu vázanou.

Volná voda se vyznačuje tím, že rychlost jejího odpařování z povrchu materiálu je stejná, jako rychlost odpařování z vodní hladiny, tj. parciální tlak páry

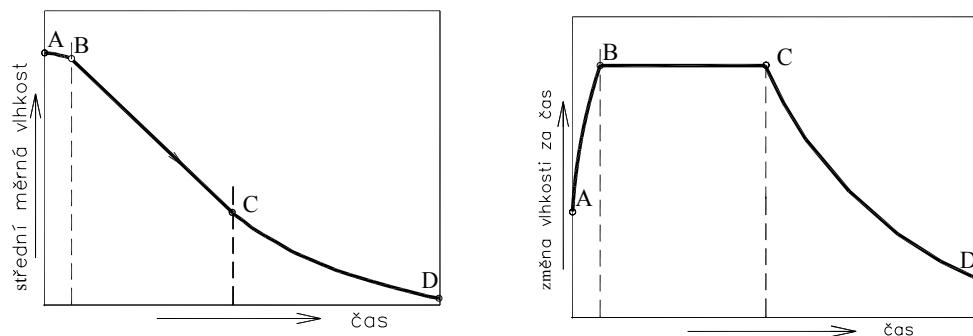
nad povrchem zboží je roven parciálnímu tlaku páry nad vodní hladinou při téže teplotě.

Hygroskopická nebo též vázaná voda vykazuje rychlost odpařování vždy menší, protože její parciální tlak nad povrchem zboží je proti předchozímu případu zmenšen silami, které vážou vodu v materiálu (např. kapilarita, buněčné a koloidní síly aj.). Vznikne tedy nižší parciální tlak než nad vodní hladinou.

Průběh sušení v různých látkách se v praxi zjišťuje na pokusných vzorcích. Aby bylo dosaženo vzájemně srovnatelných hodnot, je účelné některé veličiny udržovat na konstantní výši. Při přímém (konvekčním) sušení se udržují konstantní parametry sušícího media, tj. teplota, vlhkost i rychlost proudění podél sušeného vzorku.

Poměr množství vzduchu k množství zboží má být tak velký, aby jeho stav v důsledku výměny tepla a hmoty zůstal prakticky konstantní.

Váží-li se vzorek v určitých časových obdobích, vznikne křivka závislosti hmoty (tj. střední měrné vlhkosti) na čase, derivací této křivky vznikne časová změna měrné vlhkosti. (Obr.2.1)



Obr. 2.1: Rychlost sušení materiálu

U těchto křivek se zřetelně projevují následující úseky:

A-B - Ohřev na odpařovací teplotu, v poměru k celkové době sušení tak krátký, že se často zcela zanedbává.

B-C - Odpařování volné vody s přímkovým průběhem, tzv. úsek konstantní rychlosti sušení.

C-D - Odpařování vázané vody, nazývané úsek klesající rychlosti sušení.

2.3.1 Úsek konstantní rychlosti sušení.

Je-li v materiálu dostatečné množství volné vody, je sušení určováno výhradně přenosem hmoty, tj. odpařováním vody z povrchu zboží. Vlivem rozdílů parciálních tlaků difunduje voda z povrchu materiálu do sušícího plynu. Čím je Δp větší, tím rychleji se voda z povrchu odpařuje. Na povrchu se snížila koncentrace vody na hodnotu nižší, než je tomu ve vrstvách pod povrchem. Proto se pohybuje voda z vnitra zboží vnitřní difuzí k povrchu tak rychle, že se vrstvička vody na povrchu stále obnovuje. Jak již bylo řečeno, podobá se sušení v této fázi odpařování z vodní hladiny kdy je teplota povrchu zboží, analogicky s vodní hladinou, určena současnou výměnou tepla a hmoty. Povrch

sušeného zboží zůstává tak dlouho vlhký, pokud stačí vztlínavost v kapilárách (pórech materiálu) dodávat k povrchu vodu.

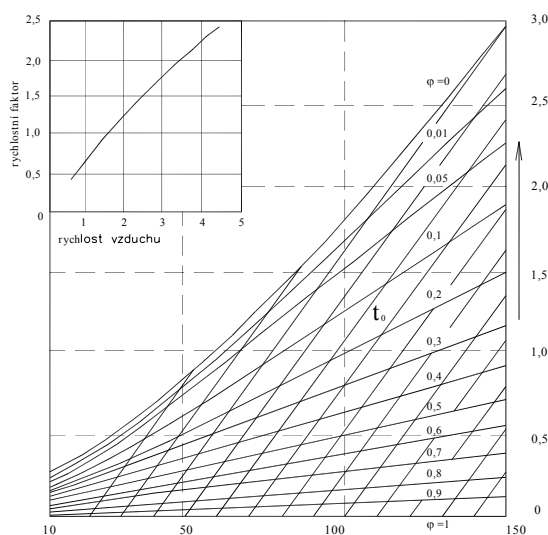
V důsledku kapilarity je vztlínavost tím silnější, čím menší je průměr kapilár, takže bude při postupujícím sušení především ve velkých pórech klesat meniskus pod povrch a zatahovat se dovnitř. Omočená plocha povrchu se začne zmenšovat nejprve o tyto plošky. Postupně se vyprazdňování konců kapilár rozšiřuje na menší a menší póry, takže omočená plocha se zmenšuje, i když je tento úbytek jen malým zlomkem celkové plochy. V poslední části úseku B-C nemůže být, přesně vzato, rychlost sušení konstantní, ale uvedené vlivy jsou v této fázi tak malé, že nemají praktický význam.

Zvyšování rychlosti sušení v tomto úseku je tedy možné zvyšováním rozdílu parciálních tlaků, vyšší teplotou a rychlostí vzduchu a jeho nižší relativní vlhkostí. Rychlost sušení je ovšem možno zvyšovat jen pokud to materiál dovolí. Zejména koloidní látky vyžadují menší Δp , aby nebyla přerušena vnitřní difuze, která by měla za následek přesušení povrchu a jeho popraskání.

Tento úsek konstantní rychlosti sušení trvá až do bodu C, nazývaného kritický bod.

Protože se v této fázi sušení jedná o fyzikálně jednoznačný pochod vypařování, je množství kapaliny, odpařené v časové jednotce při konstantních parametrech vzduchu odvislé pouze od součinitele přenosu hmoty β a od povrchové teploty zboží.

Pro případ dvojice voda-vzduch se tato teplota rovná teplotě vlhkého teploměru za předpokladu, že teplo bude látce předáváno pouze prouděním. V praxi nebývá tato podmínka vždy splněna, protože se teplo předává často navíc i sáláním a vedením. V pásmu konstantní rychlosti sušení je tedy i teplota konstantní, ale může být poněkud vyšší než teplota vlhkého teploměru.



Obr. 2.2: Rychlost sušení při různých teplotách vody a vzduchu

Legenda: t_0 - teplota povrchu vlhkého předmětu (t_0 lze vzít totožnou s teplotou vlhkého teploměru)

t - teplota vzduchu

Na základě podobnosti přestupu tepla a přenosu hmoty je možno vypočítat příslušné teplotní součinitele.

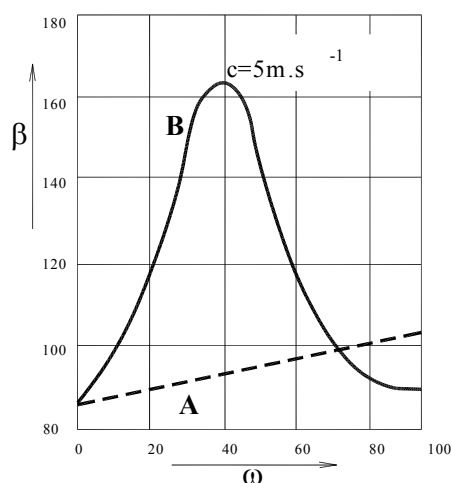
Ke zjištění rychlosti sušení u dvojice vzduch voda při povrchovém odpařování lze s určitou přibližností použít diagramu Obr.2.2.

Z pomocného diagramu lze určit koeficient závisující na rychlosti proudu vzduchu, jímž se násobí výsledná hodnota. Z pokusů vyšlo najevo, že v souladu s přestupem tepla i součinitel přenosu hmoty β stoupá s $w^{0,8}$ (w = rychlost vzduchu v ms^{-1}).

2.3.1.1 Způsoby zvyšování přestupu tepla i přenosu hmoty v úseku konstantní rychlosti sušení

Dosavadní úvahy se týkaly proudu, rovnoběžného s rovinnou plochou. Otáčí-li se plochým předmětem tak, aby rovina jeho povrchu svírala se směrem proudu vzduchu úhel ω , zvyšuje se β na čelní straně desky až do $\omega = 90^\circ$ lineárně (Obr.2.3 čára A). Na odvrácené straně desky je v důsledku vírových jevů přestup intenzivnější (Obr.2.3 křivka B). Při rychlosti $w=5 \text{ ms}^{-1}$ je maximum při $\omega = 40^\circ$ a při $\omega > 70^\circ$ klesnou hodnoty β pod hodnoty, dosažitelné při daném úhlu na čelní straně.

Ze sdílení tepla je známo, že při rovnoběžném ofukování plochy se vytvoří směrem proudu rostoucí laminární vrstvička, která zhoršuje přestupy tepla i hmoty. Narušováním této vrstvy se docílí zlepšení přestupních podmínek. Je možné toho docílit různými překážkami nad zbožím, které zvyšují turbulenci vzduchu, nebo systémem otvorů či dýz, jimiž proudí vzduch k ploše pod velkým úhlem.



Obr. 2.3: Závislost velikosti součinitele přestupu hmoty β na úhlu ofukování ω

Drátěné pletivo pásů pásových sušáren způsobuje též zvýšení turbulence. V některých případech je vhodné sušeným předmětem během sušení otáčet. Pro předměty se zakřivenými plochami platí poměry známé při proudění kolmo k ose válce, nebo kolem koule.

Pochod konstantní rychlosti sušení v úseku B-C probíhá zhruba řečeno tak dlouho, pokud se vypařuje volná voda. Mezní bod tohoto úseku C je nazýván kritický, a odpovídá mu kritická vlhkost (Obr.2.1). Za tímto bodem následuje úsek klesající rychlosti sušení.

2.3.2 Úsek klesající rychlosti sušení

Nemůže-li být k povrchu zboží přiváděno z vnitřních vrstev tolik vlhkosti, kolik se jí za stávajících podmínek odpaří, rychlost sušení se zpomaluje. Na čáře závislosti střední měrné vlhkosti na čase se to projevuje inflexním bodem (Obr.2.1), resp. u křivky časové změny měrné vlhkosti (Obr.2.1) zlomem.

V tomto úseku je průběh rychlosti sušení ovlivňován více rozdělením vlhkosti ve zboží, než parametry vzduchu, proudícího podél povrchu. Odpor při přenosu hmoty (vodní páry) mezi povrchem zboží a vzduchem je v této fázi zanedbatelný, proti odporu působenému silami zadržujícími vodu ve zboží. Jsou to zejména síly kapilární, difuzní a koloidní v poměru, který závisí na vlastnostech zboží.

Protože je sušení v oblasti za kritickým bodem ovládáno jinými fyzikálními podmínkami než v pásmu konstantní rychlosti sušení, je znalost polohy kritického bodu důležitá pro posouzení a vedení sušícího pochodu. Posunutí kritického bodu ve směru zmenšující se vlhkosti je výhodné, protože se tak prodlouží pásmo konstantní (a tedy nejvyšší) rychlosti sušení. Toho lze docílit především zlepšením rovnoměrnosti sušení, které zabrání vytvoření přeschlé povrchové kůry. V řadě případů je výhodné, aby byla snížena rychlost i teplota vzduchu, zvýšena jeho relativní vlhkost, aby byly zmenšeny rozměry, zejména tloušťka zboží atd. Jako příklad lze uvést, že suší-li se hlína při $t = 35^{\circ}\text{C}$, docílí se zvýšením relativní vlhkosti směsi spalin a vzduchu z 18 na 75% , posunutí kritické vlhkosti z 20 na 11% vody.

Dle způsobu, jakým je voda v tomto pásmu (C-D) vázána, je možno rozdělit látky na nehygroskopické a hygroskopické.

- Nehygroskopické látky

Ne hygroskopické jsou hlavně látky s velkými póry a dutinami. Při postupujícím sušení se vodní hladina zatahuje stále více pod povrch. Vlhkost, než může být odvedena z povrchu zboží sušícím plynem, musí nejprve difundovat prázdnými póry. Pro rychlost sušení proto nejsou směrodatné parametry sušícího plynu, tak jako je tomu v pásmu konstantní rychlosti sušení.

- Hygroskopické látky

Tyto látky lze dále rozdělit na látky hygroskopické při každém obsahu vody a látky hygroskopické při určitém obsahu vody.

2.4 Výpočet sušáren

Suší-li se nějaká látka, je nutno příslušnou část vody proměnit v páru. K tomu je zapotřebí tepla.

Sušící pochod je možno určit rovnicí tepelné bilance pro počáteční i konečný stav. Tím je vyjádřen přestup tepla jako jeden z obou základních jevů při sušení.

Přenos hmoty jako druhý základní děj může být popsán rovnicí látkové bilance, pro zúčastněné komponenty. I zde lze zachytit pouze počáteční a konečný stav. Tyto děje označujeme jako statiku sušení.

Pro praktický výpočet sušárny se vychází z obou uvedených bilancí. V následujícím přehledu jsou uvedena označení veličin, užívaných pro látkové bilance:

G_1	hmotnost vlhkého zboží (materiálu)	kg	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
G_2	hmotnost usušeného zboží	kg	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$G_{\text{suš.}}$	hmotnost sušiny	kg	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$W=W_1-W_2=G_1-G_2$	hmotnost vysušené vody	kg	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$W_1=G_1-G_{\text{suš.}}$	hmotnost vody ve vlhkém zboží	kg	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$W_2=G_2-G_{\text{suš.}}$	hmotnost vody v usušeném zboží	kg	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
$w_1 = \frac{W_1}{G_1} = \frac{G_1 - G_{\text{suš.}}}{G_1} \cdot 100$	relativní vlhkost vlhkého zboží	%	%
$w_2 = \frac{W_2}{G_2} = \frac{G_2 - G_{\text{suš.}}}{G_2} \cdot 100$	relativní vlhkost usušeného zboží	%	%
$u_1 = \frac{W_1}{G_{\text{suš.}}} = \frac{G_1 - G_{\text{suš.}}}{G_{\text{suš.}}}$	měrná vlhkost vlhkého zboží	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
$u_2 = \frac{W_2}{G_{\text{suš.}}} = \frac{G_2 - G_{\text{suš.}}}{G_{\text{suš.}}}$	měrná vlhkost usušeného zboží	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$	

Pomocí počátečního a konečného hmotnostního podílu vlhkosti zboží (relativní vlhkosti), které jsou obvykle dány nebo požadovány, lze uvedené hodnoty vyjádřit následovně:

$$G_1 = G_2 \cdot \frac{100 - w_2}{100 - w_1} \qquad G_1 = G_2 \cdot \frac{100 - w_2}{100 - w_1} \qquad (2.1)$$

$$G_{\text{suš.}} = \frac{G_1(100 - w_1)}{100} = \frac{G_2(100 - w_2)}{100} \qquad (2.2)$$

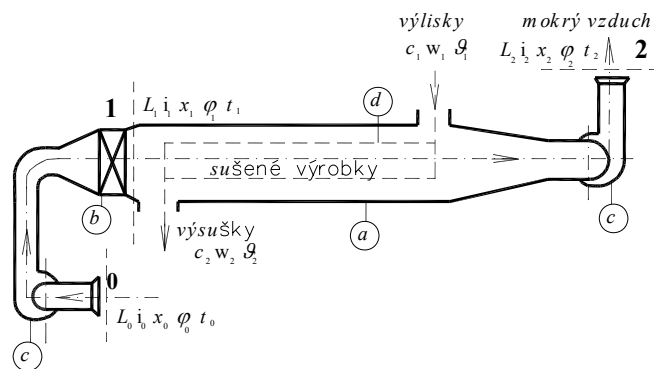
$$W_1 = \frac{G_1 w_1}{100} \qquad W_2 = \frac{G_2 w_2}{100} \qquad (2.3)$$

$$W = \frac{G_1 w_1 - G_2 w_2}{100} = G_1 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2} = G_2 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_1} \qquad (2.5)$$

Použití měrné vlhkosti je pro výpočet často výhodnější, neboť úbytek vody při sušení lze vyjádřit rozdílem k němuž stačí znát hmotnost zboží před a po sušení:

$$u_1 - u_2 = \frac{G_1}{G_{\text{suš.}}} - \frac{G_2}{G_{\text{suš.}}} \qquad (2.6)$$

Sušící způsob, při němž se teplo nutné k odpařování sdílí vysoušenému materiálu prouděním sušícího media, tzv. konvekční sušení, lze znázornit následujícím schématem:



Obr. 2.4: Schéma konvekčního sušení

Legenda: a - Sušící komora, která se naplňuje materiálem určeným k sušení.

b - Ohříváč vzduchu - výměník tepla, konstruovaný dle použitého zdroje tepla nebo vyvíječ kouřových plynů a zařízení na směšování se vzduchem. Místo výměníku je zde topeniště.

c - Ventilátory pro pohyb sušícího vzduchu. Jejich umístění a parametry jsou rozhodující nejen pro pohyb vzduchu v sušící komoře, ale i pro tlakové poměry.

d - Zařízení pro manipulaci s materiálem, tj. vozíky, dopravníky, shrabovače aj.

Pracuje-li sušárna při jiném než atmosférickém tlaku, musí být sušící komora plynotěsná, u vakuové sušárny přichází v úvahu kromě uvedených částí ještě řádně dimenzovaný kondenzátor a příslušná vývěva.

2.4.1 Spotřeba vzduchu a tepla v teoretické sušárně

Teoretická sušárna je idealizované zařízení, které při započítání práce obsahuje již ohřátý vzduch. Taková sušárna nemá ztráty stěnami, ani ztráty ohřátím dopravních zařízení, ani ztráty v sušeném materiálu. Předpokládá se, že teplota materiálu vstupujícího i usušeného je 0°C .

Hmota vzduchu sušárnou procházejícího je konstantní, tj. zařízení nemá netěsnosti, jimiž by se vzduch ztrácel nebo přísával.

Rovnice látkové bilance vody má pak tvar:

$$L_0 x_0 + \frac{G_1 w_1}{100} = L_2 x_2 + \frac{G_2 w_2}{100} \quad (2.7)$$

$$\text{Jestliže} \quad L_0 = L_1 = L_2 = L \quad [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (2.8)$$

$$\text{pak} \quad L(x_2 - x_0) = \frac{G_1 w_1 - G_2 w_2}{100} = W \quad [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (2.9)$$

L – množství vzduchu

x – měrná vlhkost vzduchu

indexy 0 – vstupující vzduch, 1 – ohřátý vzduch, 2 – vzduch vystupující ze sušárny

Dělením rovnice množstvím odpařené vody W nám vyjde spotřeba suchého vzduchu k odpaření 1 kg vody.

$$\frac{L}{W} = l = \frac{1}{x_2 - x_0} \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.10)$$

Každý kilogram suchého vzduchu se v ohřívači (kalfiferu) ohřeje z teploty t_0 na t_1 při tom se jeho entalpie zvýší z i_0 na i_1 .

Jde-li o určení spotřeby tepla k odpaření 1 kg vody, je k tomu třeba l kilogramů vzduchu.

Proto spotřeba tepla k odpaření 1 kg vody:

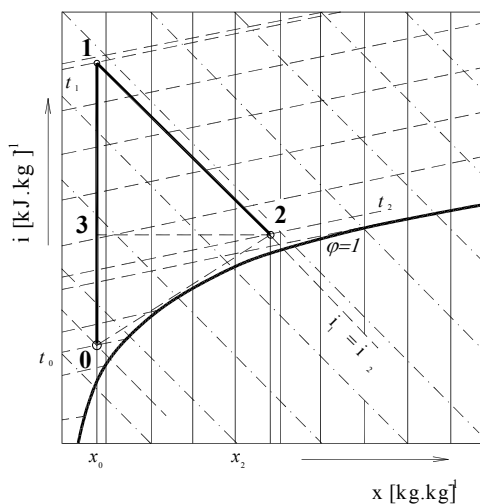
$$q = l(i_1 - i_0) = \frac{i_1 - i_0}{x_2 - x_0} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.11)$$

Rovnice tepelné bilance teoretické sušárny je:

$$L_0 i_0 + Q_k = L_1 i_1 = L_2 i_2 \quad [\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (2.12)$$

Q_k je teplo dodané vzduchu v kalfiferu (ohřívači).

Co se děje se vzduchem při průchodu sušárnou je schématicky znázorněno na následujícím obrázku (Obr.2.5).



Obr. 2.5: Chování vlhkého vzduchu v teoretické sušárně

0-1 odpovídá ohřevu vzduchu a to bez změny vlhkosti, proto probíhá po $x = \text{konst.}$

1-2 je průběh vlastního sušení, dle čáry $i = \text{konst.}$ Zde nastává výměna tepla i vlhkosti. Teplota vzduchu klesá, protože teplo se spotřebovává k vy-
pařování vody ze zboží.

2-3 tato vzdálenost představuje rozdíl vlhkosti mezi body 0 (1) a bodem 2. Této délce odpovídá rozdíl obsahu vody ve vzduchu mezi body 2 a 0, x_2 a x_0 , a spotřeba vzduchu k odpaření 1 kg vody je v soulase s rovnicí (2.10.)

Protože platí vztah (2.12) a vztah (2.8) musí v teoretické sušárně platit:

$$i_1 = i_2 \quad (2.13)$$

Ze vztahu (2.14) plyne, že v teoretické sušárně probíhá vlastní proces sušení při stálé entalpii $i = \text{konst.}$ (Obr. 2.5).

2.4.2 Tepelná bilance teoretické sušárny

Základní podmínkou práce teoretické sušárny je vztah $i_1 = i_2 = \text{konst.}$ z toho vyplývá, že spotřeba tepla k odpaření 1 kg vody bude:

$$q = l(i_1 - i_0) = l(i_2 - i_0) \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.14)$$

$$i_2 = c_2 \cdot t_2 + x_2 \cdot i'_2 \quad [\text{kJ}] \quad (2.15)$$

$$i_0 = c_0 \cdot t_0 + x_0 \cdot i'_0 \quad [\text{kJ}] \quad (2.16)$$

$$c_2 = c_0 = c_v \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}] \quad (2.17)$$

Legenda: c - měrné teplo suchého vzduchu, které prakticky není závislé na výšce teploty

x_2 a x_0 - obsah vody v kilogramech na 1 kg suchého vzduchu

i'_2 a i'_0 - tepelný obsah vodní páry obsažené ve vzduchu

$$i' = 2482 + 1,92 \cdot t \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.18)$$

Dosazením těchto hodnot do rovnice (2.15) obdržíme:

$$q = l[(c_v t_2 + x_2 i'_2) - (c_v t_0 + x_0 i'_0)] \quad [\text{kJ}] \quad (2.19)$$

Upravením rovnice, přičtením a odečtením členu $l x_0 i'_2$ obdržíme rovnici:

$$q = l \cdot c_v (t_2 - t_0) + l x_0 (i'_2 - i'_0) + i'_2 (l x_2 - l x_0) \quad [\text{kJ}] \quad (2.20)$$

Protože platí vztah (2.13) je závorka posledního členu rovna 1 a po úpravě dostáváme:

$$q = i'_2 + l \cdot c_v (t_2 - t_0) + l x_0 (i'_2 - i'_0) \quad [\text{kJ}] \quad (2.21)$$

$$\text{Spotřeba je dána součtem třech členů:} \quad q = q_1 + q_2 + q_3 \quad (2.22)$$

$q_1 = i'_2$ - spotřeba tepla k vypaření vody ze zboží. Protože se dle základního předpokladu rovná teplota zboží i vody, kterou obsahuje nule, je v tomto případě teplo i'_2 rovno výparnému teplu vody při 0°C což je 2482 kJ.kg⁻¹

$q_2 = l \cdot c_v (t_2 - t_0)$ - teplo potřebné k ohřátí vzduchu z t_1 na t_2 .

$q_3 = l x_0 (i'_2 - i'_0)$ - teplo na zvýšení entalpie vody obsažené v sušícím vzduchu

2.4.3 Spotřeba vzduchu a tepla ve skutečné sušárně

Ve skutečné sušárně vznikají nejen tepelné ztráty, ale může být i dodatečný přívod tepla, kromě ohřevu vzduchu v kaloriferu, jako např. přídavné ohříváče v sušící komoře, ohřev vzduchu ve ventilátoru, uvolňující se krystalizační teplo v sušeném zboží aj.

Pro skutečnou sušárnu neplatí vztah $i_2 = i_1$,

$$\text{ale obecně} \quad i_2 = i_1 + \frac{\Delta}{l} \quad (2.23)$$

kde Δ je ztracené nebo dodatečně přivedené teplo na 1 kg odpařené vody.

Při sestavování tepelné bilance musíme rozlišovat mezi sušárnou pracující periodicky, kde se tepelná bilance vyjadřuje v kJ za 1 pracovní cyklus a kontinuálně, kde se tepelná bilance vyjadřuje v kJ.hod⁻¹.

Přívod tepla:

- Q_k - teplo přivedené vzduchu v ohřivači
- $L_0 \cdot i_0$ - teplo obsažené ve vstupujícím vzduchu
- $G_2 \cdot c_m \cdot \vartheta_1$ - teplo obsažené v části zboží, které jako usušená bude odebráno
- $W \cdot c_w \cdot \vartheta_1$ teplo obsažené ve vodě odvedené v sušárně
- $G_d \cdot c_d \cdot \vartheta_{d1}$ teplo přivedené dopravními zařízeními
- Q_{dod} - teplo přivedené dodatečným ohřevem

Odvod tepla:

- $L_2 \cdot i_2$ - teplo odvedené vlhkým vzduchem
- $G_2 \cdot c_m \cdot \vartheta_2$ - teplo odvedené usušeným zbožím
- $G_d \cdot c_d \cdot \vartheta_{d2}$ - teplo odvedené dopravními zařízeními
- Q_s - teplo potřebné k vyhřátí skříně
- Q_z - tepelné ztráty do okolí

Teplo potřebné k vyhřátí skříně se uvažuje jen u periodických sušáren. Při sestavování tepelných bilancí musí být počítáno i s ohřátím vzduchu při průchodu ventilátorem.

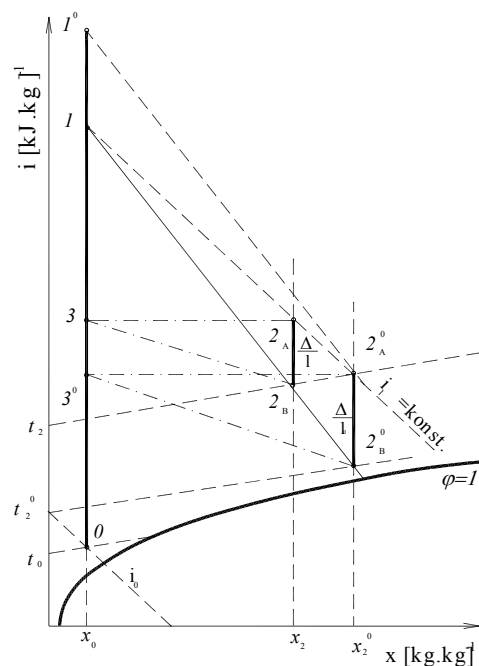
2.4.4 Sestrojení skutečného procesu sušení v i-x diagramu

Pro výpočet skutečné sušárny je nutno znát stav vzduchu přiváděného (bod 0) a jednu z hodnot stavu vzduchu opouštějícího sušárnu (bod 2), buď teplotu (t_2) nebo relativní vlhkost (φ_2).

Při znázornění skutečného procesu vycházíme z procesu teoretického, probíhajícího po izoentalpě $i_1 = i_2 = \text{konst.}$, přičemž ztráty $\frac{\Delta}{l}$ jsou připočteny

v jednom bodě, např. v konečném bodě procesu, dle rovnice: $i_2 = i_1 + \frac{\Delta}{l}$

Grafické znázornění (Obr.2.6) se provede stanovením sklonu čáry sušení, který může být větší (pro $\Delta < 0$) nebo menší (pro $\Delta > 0$) než čára $i = \text{konst.}$



Obr. 2.6: Chování vlhkého vzduchu ve skutečné sušárně

Nejprve se zakreslí teoretický pochod, čára $i_1 = \text{konst.}$ se vede až k průsečíku s danou isotermou (t_2) (bod 2_A^0).

Spotřeba suchého vzduchu na 1 kg odpařené vody v tomto teoretickém procesu by byla

$$l_0 = \frac{1}{x_2^0 - x_0} \quad [\text{kg}] \quad (2.23)$$

Protože si všechny tepelné ztráty představujeme soustředěny do bodu 2_A^0 , sníží se tepelný obsah i (pro $\Delta < 0$) o ztráty připadající na 1 kg suchého vzduchu.

Vynesením hodnoty $\frac{\Delta}{l_0}$ směrem dolů (ztráty) obdrží se bod 2_B^0 . Tento bod je

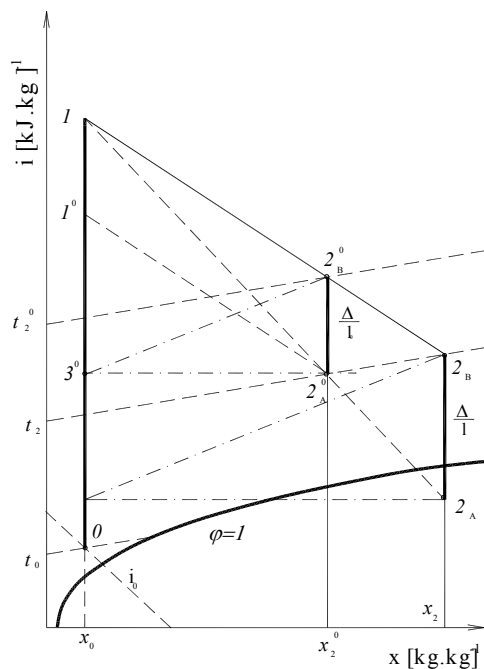
konečným bodem jistého procesu $t_2^0 < t_2$. Protože bod 1 je stejný při teoretickém i při skutečném procesu, je čára $1-2_B^0$ polytropickou přímkou s větším sklonem, než čáry $i = \text{konst.}$ Konečný bod procesu však musí ležet na dané teplotě t_2 , tedy v průsečíku polytropy $1-2_B^0$ a t_2 . Úsečka 2_A-2_B je pak v příslušném měřítku veličinou $\frac{\Delta}{l}$. Z podobnosti trojúhelníků vyplývá, že:

$$\frac{\Delta}{l} = \frac{\Delta}{l_0} \cdot \frac{x_2 - x_0}{x_2^0 - x_0} \quad (2.24)$$

Je zřejmé, že je-li $\Delta < 0$, odpovídá výslednému bodu skutečného procesu menší x_2 a menší i_2 než by tomu bylo v procesu teoretickém. Proto je v porovnání s teoretickou sušárnou, skutečná spotřeba vzduchu i tepla vyšší pro odpaření 1

kg vody což znamená nutnost volby výkonnějších ventilátorů a větší plochy ohřivačů.

Má-li naopak být dodržen konečný stav vzduchu po sušení o parametrech 2_A^0 (např. při práci v několikastupňové sušárně), je nutno zvětšit ohřev vzduchu v kaloriferu na stav 1^0 o hodnotu $t_2 - t_2^0$ °C, jak vyplývá z rovnoběžníku $1, 1^0, 2_A^0, 2_B^0$. (Obr.2.6)



Obr. 2.7: Chování vlhkého vzduchu ve skutečné sušárně

Jedná-li se naopak o sušárnu, kde dodatečný přívod tepla převyšuje ztráty (pro $\Delta > 0$), probíhá polytropa sušení nad čarou $i=\text{konst.}$, s menším úhlem sklonu (Obr.2.7). Postup práce je úplně stejný, jen hodnota $\frac{\Delta}{l}$ se nevynáší dolů, nýbrž

nahoru, nad bod 2_A^0 a to opět po čáře $x_2^0 = \text{konst.}$ V tomto případě je $x_2 > x_2^0$ a $i_2 > i_1$. Spotřeba suchého vzduchu na 1 kg odpařené vody je menší než v teoretické sušárně. Rovněž spotřeba tepla je menší. Má-li být dodržen stav vzduchu po sušení o parametrech příslušných bodu 2_A^0 , ohřev vzduchu v kaloriferu bude nižší o hodnotu $t_2^0 - t_2$ °C.

Jsou-li dány dva teoretické procesy sušení, jejichž počáteční a konečné body leží na jedné přímce platí, že $q = \text{konst.}$

Teoretické pochody sušení, jejichž počáteční a konečné stavy sušícího vzduchu leží v $i-x$ diagramu na jedné přímce mají stejnou měrnou spotřebu tepla.

Znázorní-li se takový oběh v $i-x$ diagramu, nakresleném pro větší názornost tak, aby čáry $x = \text{konst.}$ svíraly úhel 45° (Ramsinův diagram Obr. 2.8), platí z trojúhelníku $0; 1; 2$ a $(0' 1' 2')$:

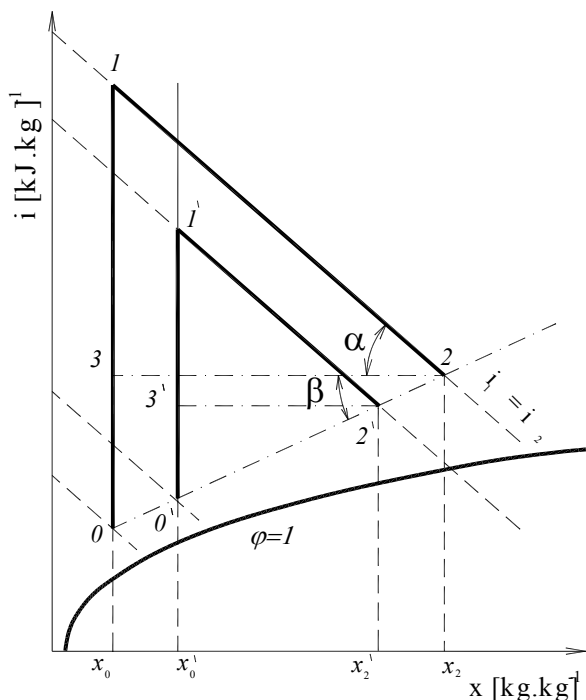
$$\overline{1-3} = \overline{2-3} \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

$$\overline{0-3} = \overline{2-3} \cdot \operatorname{tg} \gamma$$

$$\overline{0-1} = \overline{1-3} + \overline{0-3} = \overline{2-3} \cdot (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \gamma)$$

$$\frac{\overline{0-1}}{\overline{2-3}} = q = \operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \gamma$$

Protože je v našem případě $\operatorname{tg} \alpha = 1$, je $q = 1 + \operatorname{tg} \gamma$ (2.25)



Obr. 2.8: Ramsinův diagram

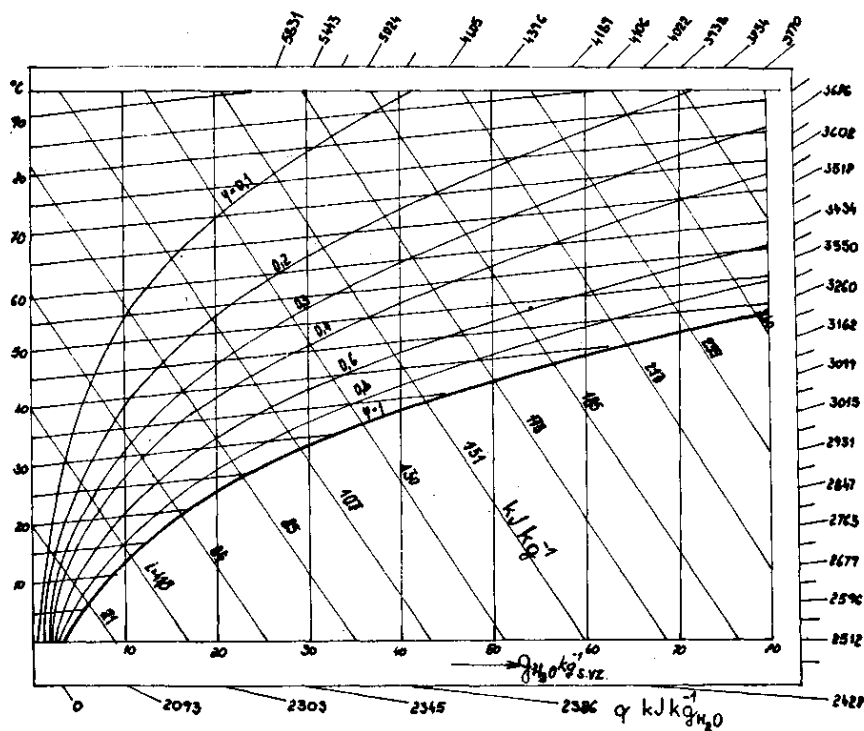
Z rovnice (2.25) vyplývá, že hospodárnost sušení, tj. spotřeba tepla k odpaření 1 kg vody, může být posouzena dle sklonu (úhel γ) spojnice 0-2 v i-x diagramu.

Úhel se zmenšuje změnou následujících parametrů:

- Zvýšením teploty vstupujícího vzduchu (t_0)
- Snížením jeho relativní vlhkosti (φ_0)
- Zvýšením teploty ohřátí vzduchu (t_1)
- Snížením teploty odcházejícího vzduchu (t_2)
- Zvýšením jeho relativní vlhkosti (φ_2)

Je samozřejmé, že tyto předpoklady platí i u i-x diagramů, které z důvodů pohodlnějšího zobrazování některých dějů mají úhel α jiný než 45° . Paprsky vedené z nulového bodu diagramu (tj. $x = 0$), znázorňují různé spotřeby tepla

$q = \frac{di}{dx}$. Některé diagramy (Obr.2.9) mají tyto hodnoty vyneseny na okrajovém měřítku. Paprsek rovnoběžný se spojnicí 0-2 určuje spotřebu tepla dané sušárny.


 Obr. 2.9: Molliérův i - x diagram s uvedenými spotřebami tepla q

2.4.5 Různé druhy pochodů sušení

Dosud byly probrány pochody s jednoduchým oběhem sušícího vzduchu, kde se upotřebený vzduch odvádí bez dalšího využití v sušárně do atmosféry. Ačkoliv u některých sušáren (např. rozprachových) se z důvodů, které budou uvedeny později používá i tohoto oběhu, pracuje většina průmyslových sušáren tak, že část použitého vzduchu se vrací zpět do sušárny. Mluvíme pak o recirkulaci vzduchu, která má některé výhody a používá se v nejrůznějších kombinacích.

2.4.5.1 Sušárna s recirkulací vzduchu

Schéma sušárny a jeho oběh v i - x diagramu je znázorněno na Obr.2.10. Z rovnice kontinuity je zřejmé, že množství vzduchu přicházejícího i odcházejícího jsou stejná a pro 1 kg odpařené vody platí:

$$l = \frac{1}{x_2 - x_0}$$

Toto množství vzduchu odvádí odpařenou vlhkost ven.

Smísí-li se 1 kg čerstvého vzduchu s n kg recirkulujícího vzduchu vznikne $(1+n)$ kg vzduchu o stavu x_s . Vyjádří-li se množství cirkulující pomocí absolutních vlhkostí x , platí rovnice:

$$x_0 + nx_2 = (1+n) \cdot x_s \quad (2.26)$$

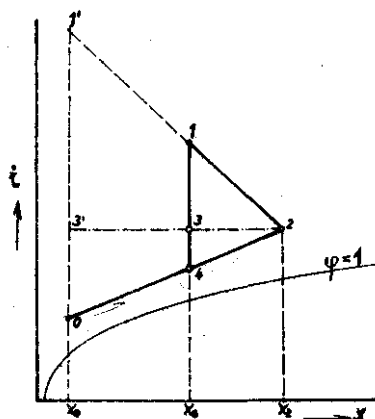
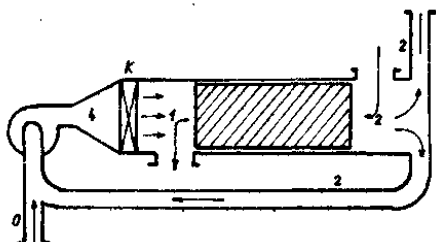
$$x_s - x_0 = n \cdot (x_2 - x_s) \quad n = \frac{x_s - x_0}{x_2 - x_s} \quad 1 + n = \frac{x_2 - x_0}{x_2 - x_s}$$

Množství cirkulujícího vzduchu se určí z podmínky, že při odpaření 1 kg vody zvýší směs svoji absolutní vlhkost z x_s na x_2 .

$$l_{cirk} = l(n+1) = \frac{1}{x_2 - x_0} \cdot \frac{x_2 - x_0}{x_2 - x_s} = \frac{1}{x_2 - x_s} \quad (2.27)$$

Teplo potřebné k odpaření 1 kg vody lze stanovit z podobných trojúhelníků (Obr.2.10).

$$\frac{0-1'}{2-3'} = \frac{4-1}{2-3} = q = konst. \quad (2.27)$$



Obr. 2.10: Sušárna s recirkulací vzduchu

Pro lepší názornost bylo zde opět použito teoretického oběhu pro sušení, kde $i_2 = i_1$, základní vztahy tím však nejsou změněny.

Z uvedeného je vidět, že recirkulací upotřebeného vzduchu se nemění spotřeba tepla q , zato se zvyšuje množství vzduchu procházejícího sušárnou, a tedy i spotřeba energie pro jeho dopravu. Spotřeba je tím větší, čím je větší n .

Přesto vykazují recirkulace následující výhody:

- Řada látek při sušení a zejména při dosoušení se lépe chová při použití vlhčího vzduchu, který brání vytvoření trhlinek, nerovnoměrnému usušení různě tlustých částic atd. Při sušení keramiky v sušárně o jednoduchém oběhu by bylo nutno vstupní vzduch zvlhčovat, což by mělo za následek dodatečnou spotřebu tepla.
- Při recirkulaci lze změnou poměru vzduchu čerstvého a upotřebeného provádět jemnou regulaci vlhkosti sušícího vzduchu.
- Sníží se podstatně teplota vzduchu a sušící potenciál, což je výhodné při práci s choulostivými materiály.
- V sušící komoře je možnost nastavení rychlosti vzduchu v širokých mezích. Zvýšení rychlosti má za následek zvýšení součinitelů přestupu tepla i hmoty. Tím se doba sušení zkracuje, což ve skutečném procesu vede ke snížení q .

2.4.5.2 Sušárna s meziohřevem vzduchu

Tento typ sušárny nabízí jinou možnost sušení. Je to vlastně řada jednoduchých sušáren. Na Obr.2.11 je znázorněn proces třístupňové sušárny. Množství vzduchu je ve všech pásmech stejné, proto

$$l = \frac{1}{(x'_2 - x_0) + (x''_2 - x'_2) + (x_2 - x''_2)} = \frac{1}{x_2 - x_0} \quad (2.28)$$

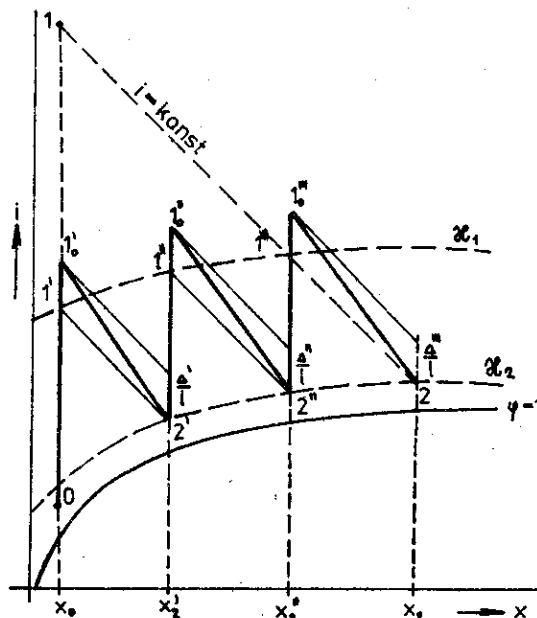
Spotřeba vzduchu i tepla k odpaření 1 kg vody je stejná pro jednoduché i více-
 stupňové sušení, pokud probíhá mezi 0-2. Teplota jednotlivých postupných
 ohřevů t'_1 t''_1 t'''_1 je v naznačeném případě stejná, může však být volena celkem
 libovolně, podle technologické potřeby. S postupným sušením se mohou pří-
 padně tyto teploty i snižovat, zejména při souproudu vzduchu a zboží.

Postupného ohřevu se používá především pro materiál citlivý na vysoké teploty
 a pro docilení vysoké rovnoměrnosti vysoušení. Také body $2'$ $2''$ $2'''$ mohou,
 avšak nemusí ležet na jedné přímce.

V sušárnách s postupným ohřevem vzduchu nebo s postupným ohřevem a re-
 cirkulací, pokud nepracují nepřetržitým způsobem, tj. do jejichž každého pás-
 ma přichází čerstvé zboží paralelně, je nutno upravit proces sušení tak, aby v
 každém pásmu trvalo sušení stejnou dobu, tj., aby v celé sušárně byl konstantní
 potenciál sušení.

Pro snadnější návrh takového procesu se do i - x diagramu často zakreslují čáry
 se stálou hodnotou buď rozdílu parciálních tlaků vodní páry v sušicím mediu a
 na povrchu sušené látky, příp. rozdílu absolutních vlhkostí, či rozdílu teplot.
 Tyto čáry se nazývají křivky stálého potenciálu sušení a označují se jako čáry
 χ . Tyto křivky se konstruují jako ekvidistanty čáry sytosti $\varphi = 1,0$ na přímkách
 adiabatického sycení vzduchu. (Případně s určitou přibližností na přímkách
 $i = \text{konst.}$)

Při sestrojování skutečného průběhu sušení v několikastupňové (pásmové) su-
 šárně se rovněž vychází z teoretické sušárny pracující za stejných podmínek.
 Je-li např. $\Delta < 0$ a jsou-li dány konečné body jednotlivých sušicích pochodů $2'$
 $2''$ $2'''$ umístěné na čáře konstantního potenciálu sušení χ , postupuje se násle-
 dovně:



Obr. 2.11: Sušárna s meziuhřevem vzduchu

Z každého bodu 2 (Obr.2.11) se nanášejí úsečky $\frac{\Delta'}{l}$ $\frac{\Delta''}{l}$ $\frac{\Delta'''}{l}$ v tomto případě
 opačným směrem, než u jednoduché sušárny, protože musí být zachována po-
 loha bodů 2.

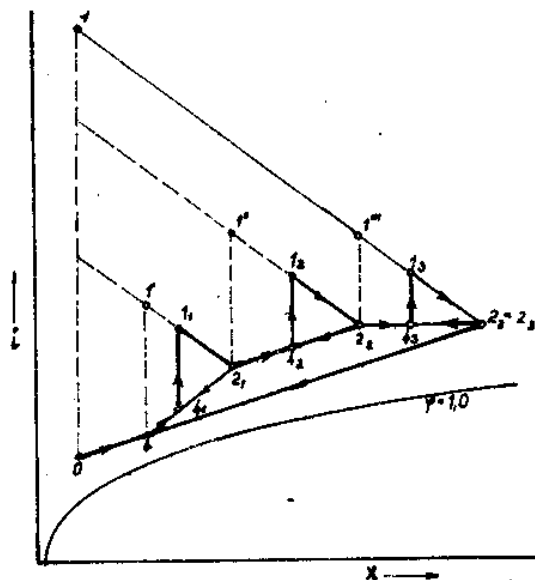
Aby toho bylo docíleno, zvýší se ohřev a tím poloha bodů 1. Δ' Δ'' Δ''' jsou vztaženy na 1 kg vody odpařené v celé sušárně. Např. pro druhé pásmo je

$$\Delta'' = q''_{\text{dod}} + \frac{W_2}{W} \cdot \vartheta'' - \left[\frac{G_2}{W} \cdot c_m \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + \frac{G_d}{W} \cdot c_d \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) + \frac{Q_z''}{W} \right] \quad (2.29)$$

kde teploty ϑ_2 znamenají teplotu výstupu, ϑ_1 teplotu vstupu pro materiál, resp. dopravník v příslušném pásmu.

Celková spotřeba tepla pro takovou sušárnu je $q = l(i_2 - i_0) + \sum q - \vartheta_1$

kde $\sum q$ je součet ztrát na 1 kg vypařené vody v celé sušárně. Připojí-li se k postupnému ohřevu i cirkulace vzduchu v jednotlivých pásmech, je možné ještě dále snížit teplotu konečných bodů ohřevu vzduchu při zachování stejné hospodárnosti. Na Obr.2.12 je uveden příklad takového oběhu. Ventilátory v jednotlivých pásmech mají zvýšený příkon vzhledem k většímu množství dopravovaného vzduchu. Je to vlastně několik cirkulačních sušáren za sebou. Tento způsob s příčnou cirkulací je nejčastěji používán u pásových nebo lískových tunelových sušáren.



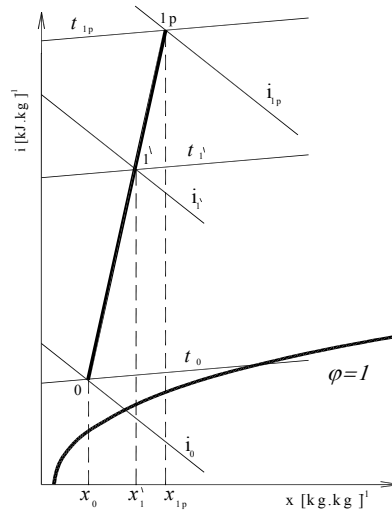
Obr. 2.12: Sušárna s meziuhřevem vzduchu (vyšší hospodárnost)

2.4.5.3 Sušení kouřovými plyny

Zboží, jemuž nevaří vysoké teploty sušícího media, popílek ani jiné zplodiny spalování, může být s výhodou sušeno bezprostředně kouřovými plyny, případně jejich směsí se vzduchem. S výhodou proto, že odpadá nutnost ohřívání vzduchu v kaloriferu, čímž se zařízení sušárny podstatně zjednoduší. Při sušení kouřovými plyny je možno sledovat jejich změny stavu v i - x diagramu pro vlhký vzduch, protože entalpie suchých kouřových plynů se jen málo liší od entalpie suchého vzduchu.

Přesně může být tepelný obsah kouřových plynů vypočten, pokud je známo chemické složení příslušného paliva. Ve většině případů jsou však k dispozici jen údaje o výhřevnosti.

Při práci s kouřovými plyny předpokládáme, že k sušení použité kouřové plyny jsou dány stavem bodu 1_p , tj. jejich entalpie i_{1p} a absolutní vlhkostí x_{1p} (Obr.2.13). Vzduch použitý ke spalování má stav i_0, x_0, t_0 . Stav bodu 1_p závisí na výhřevnosti i na vlhkosti paliva. Klesá-li výhřevnost, snižuje se konečná teplota plynů a stoupá-li % vody v palivu, zvětšuje se absolutní vlhkost bodu 1_p .



Obr. 2.13: Stav vzduchu při sušení kouřovými plyny

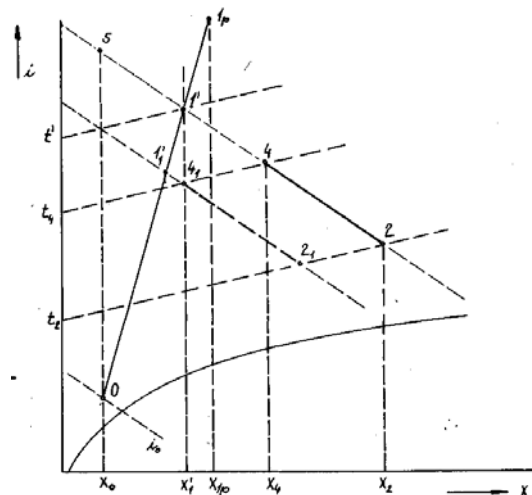
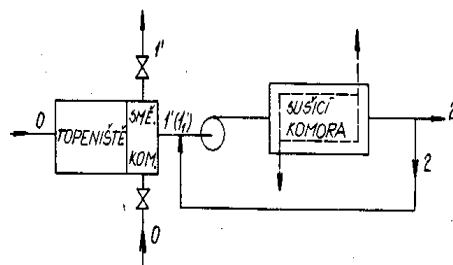
Legenda: 0 - stav vzduchu určeného pro spalování

1' - stav vzduchu odpovídající spalinám smíchaným se vzduchem

1_p - stav odpovídající stavu kouřových plynů

Proto na rozdíl od průběhu ohřívání vzduchu v kaloriferu, které je v i - x diagramu vyznačeno čarou $x = \text{konst.}$, je spojnice bodů 0 a 1' vždy více méně odchýlena od čáry $x = \text{konst.}$ Ke stanovení skutečného stavu kouřových plynů, které prakticky vždy vzniknou spálením paliva za přebytku vzduchu, je třeba určit bod 1' jako výsledný stav po smísení čistých kouřových plynů o stavu 1_p a přebytku vzduchu $L_{př}$ o stavu 0. Při tom připadá na 1 kg čistých kouřových plynů n kg přebytkového vzduchu. Stav této směsi je dán parametry:

$$x'_1 = \frac{x_1 + x_0 n}{1 + n} \quad i'_1 = \frac{i_1 + i_0 n}{1 + n} \quad (2.30)$$



Obr. 2.14: Sušení kouřovými plyny s ochlazováním vzduchu

Z bodu 1' pak probíhá vlastní sušení stejně jako při sušení vzduchem. Ve většině případů však bývá teplota směsi (t'_1) příliš vysoká pro sušenou látku a proto může být ochlazena dalším mísením se vzduchem nebo se používá sušení s cirkulací nasycené směsi. Tento pochod je vyjádřen na schématu (Obr.2.14). Směs o stavu 1' se dále mísí s nasycenou směsí o stavu 2. Při tom připadá n' kg nasycené směsi na 1 kg směsi čerstvé. Parametry bodu 4 jsou dány vztahy:

$$x_4 = \frac{x'_1 + n'x_2}{1 + n'} \quad i_4 = \frac{i'_1 + n'i_2}{1 + n'} \quad (2.31)$$

Množství nasycené směsi (2) odváděné do atmosféry, je teoreticky stejné jako množství přiváděné ze směšovací komory ($1'$)· $L_2 = L'_1$. Pak přiváděné množství vzduchu je:

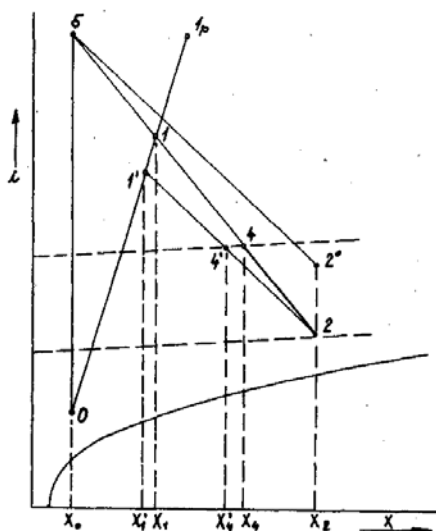
$$l_2 = l'_1 = \frac{1}{x_2 - x'_1} \quad (2.32)$$

$$\text{A cirkulují množství vzduchu je: } l_c = \frac{1}{x_2 - x_4} \quad (2.33)$$

Jsou-li kouřové plyny více ředěny vzduchem, posunuje se bod 1' po čáře 0-1_p směrem k bodu 0. Při tom prakticky nezáleží na tom, zda topeniště pracuje s nadbytečně velkým přebytkem vzduchu, nebo je-li směs vzniklá normálním spálením dodatečně zředěna vzduchem ve směšovací komoře. Nemá-li se však proces sušení změnit, je

$$t'_{1\min} \geq t_4$$

Všimneme-li si obou naznačených pochodů 4-2 i pochodu 4₁ - 2₁, jsou sice zcela podobné, ale prvý z nich při zvýšeném středním obsahu vlhkosti cirkulující směsi. Pro některé látky je to výhodné, doba sušení se ovšem poněkud prodlužuje. Kromě toho čím je konečný bod procesu posunut dále doprava, tím je sušení hospodárnější. Má-li se tedy sušit co nejvíce za vlhka, a má-li být proces co nejhospodárnější, je nutno spalovat palivo s minimálním přebytkem vzduchu a směs vycházející z topeniště temperovat pouze recirkulací nasycené směsi.



Obr. 2.15: Průběh skutečného sušícího cyklu s kouřovými plyny

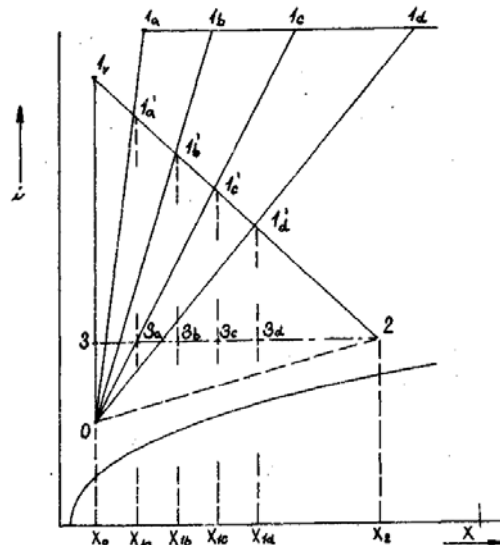
Průběh skutečného sušícího cyklu se sestaví podobným způsobem, jako pro vzduch (Obr.2.15). Je-li dán počáteční a konečný stav procesu (0,2) a např.

směšovací teplota t_4 , pak při $\Delta < 0$ se úsečka $\frac{\Delta}{l}$ vynese v měřítku entalpie z bodu 2 směrem vzhůru, aby stav bodu 2 zůstal zachován. Z tohoto bodu se vede čára $i = \text{konst.}$ až k čáře $x_0 = \text{konst.}$, čímž vznikne bod 5. Z tohoto bodu vychází polytropa, která spojnici 0-1_p protne v bodě 1 a isotermu t_4 v bodě 4. Skutečná spotřeba čerstvé směsi ze směšovací komory je

$$l_1 = \frac{1}{x_2 - x_1} \quad \text{která je větší než} \quad l'_1 = \frac{1}{x_2 - x'_1}$$

A množství cirkulujících plynů je

$$l_c = \frac{1}{x_2 - x_4} < \frac{1}{x_2 - x'_4}$$



Obr. 2.16: Průběhy sušení pro různá paliva

Stanovení spotřeby tepla pro odpaření 1 kg vody má při sušení kouřovými plyny jisté odchylky od sušení vzduchem. Sestrojí-li se (Obr.2.16) teoretické průběhy sušení pro různá paliva při stejných parametrech vnějšího vzduchu, je zřejmé, že spotřeba tepla není již úměrná $\tan \gamma$ (sklon 0-2) jako při sušení vzduchem, protože spojnice 0-1_a, 1_b, 1_c, 1_d není svislá. Spotřeba tepla se zvyšuje s rostoucím obsahem vody v palivu, a tedy se sklonem čar 0-1. Při sušení vzduchem:

$$q = \frac{0 - l_v}{2 - 3} = \frac{i_1 - i_0}{x_2 - x_0} \quad \text{zatím co} \quad q_a = \frac{0 - l_v}{2 - 3_a} \quad \text{a} \quad q_b = \frac{0 - l_v}{2 - 3_b} \quad \text{a} \quad q_c = \frac{0 - l_v}{2 - 3_c}$$

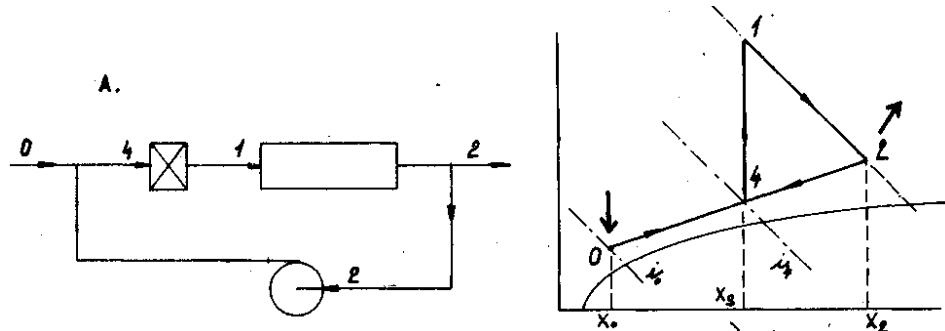
Přičemž platí, že: $q < q_a < q_b < q_c < q_d$

Zvýšení spotřeby tepla je způsobeno vodní parou vzniklou z vody obsažené v palivu při jeho spalování. Srovnáme-li spotřebu tepla spalínové sušárny se sušárnou teplotovzdušnou, vytápěnou parou, je nutno vyloučit tento přírůstek obsahu vody a současně vyloučit teplo spotřebované k jejímu vypaření.

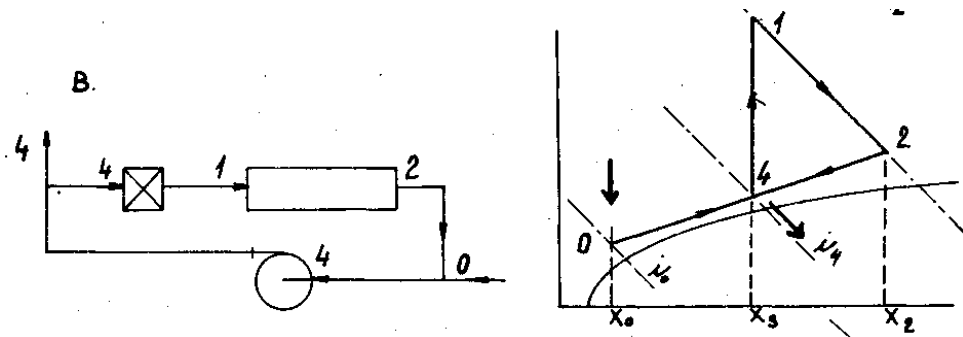
Na Obr.2.17 je znázorněn přírůstek vlhkosti $\Delta x = x'_1 - x_0$ a směšovací bod 6, odpovídající 1'. Leží sice na stejné izotermě t'_1 , ale ne na čáře $x_0 = \text{konst.}$

Pro ohřátí vzduchu z teploty t_0 na t'_1 je nutno přivést teplo $i_6 - i_0$ a tudíž rozdíl mezi teplem přivedeným směsí kouřových plynů a teplem přivedeným vzduchu

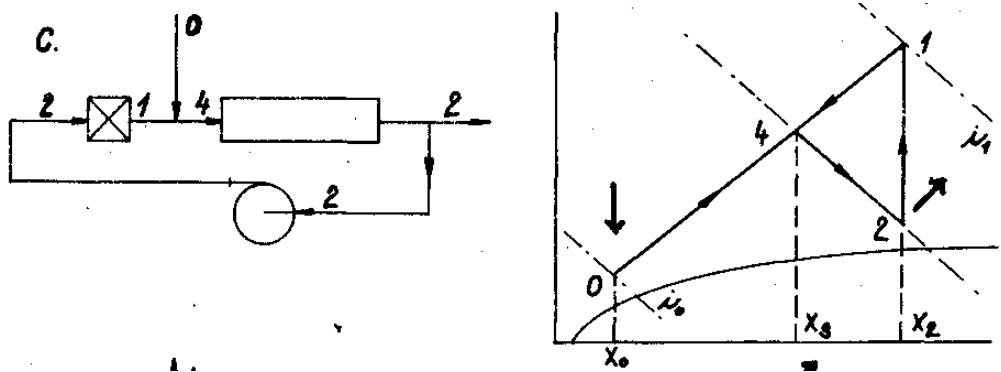
V případě, že se zboží pohybuje může být vzduch veden rovnoběžně se směrem pohybu v souproudu nebo v protiproudu. Velmi často se pohybuje vzduch i příčně ke směru pohybu zboží. Další způsoby jako je profukování vrstvy a recirkulace vzduchu se u kontinuálních sušáren často užívají.



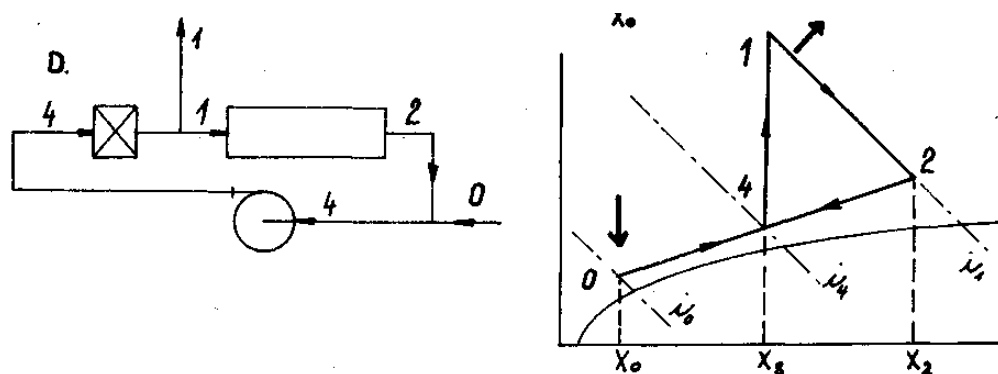
Obr. 2.18: Pohyb vzduchu v sušárně, alternativa A



Obr. 2.19: Pohyb vzduchu v sušárně, alternativa B



Obr. 2.20: Pohyb vzduchu v sušárně, alternativa C



Obr. 2.21: Pohyb vzduchu v sušárně, alternativa D

Tab.2.1: Spotřeba vzduchu a spotřeba tepla v různých typech sušáren

	MNOŽSTVÍ VZDUCHU NA 1KG ODPÁŘENÉ VODY				SPOTŘEBA TEPLA NA ODPÁŘENÍ 1KG VODY
	Čerstvý vzduch	Cirkulující vzduch	Objem vzduchu procházející sušárnou	Objem vzduchu procházející ventilátorem	
A	$l_0 = \frac{1}{x_2 - x_0}$	$l_c = \frac{1}{x_2 - x_s} = l_0 \cdot (n + 1)$	$l_c + l_0$	l_c	$q = \frac{i_1 - i_0}{x_2 - x_0}$
B	$l_0 = \frac{1}{x_s - x_0}$	$l_c = \frac{1}{x_2 - x_s} = l_0 \cdot n$	l_c	$l_c + l_0$	$q = \frac{i_1 - i_4}{x_2 - x_s}$
C	$l_0 = \frac{1}{x_2 - x_0}$	$l_c = \frac{1}{x_2 - x_s} = l_0 \cdot (n + 1)$	$l_c + l_0$	l_c	$q = \frac{i_1 - i_0}{x_2 - x_0}$
D	$l_0 = \frac{1}{x_s - x_0}$	$l_c = \frac{1}{x_2 - x_s} = l_0 \cdot n$	l_c	$l_c + l_0$	$q = \frac{i_1 - i_0}{x_s - x_0}$

Je-li sušení souproudové, stýká se čerstvý, horký vzduch s vlhkým zbožím. Velký rozdíl teplot, který je na počátku sušení má za následek počáteční mohutnou výměnu tepla i hmoty. Zprvu je potenciál sušení velmi vysoký, ke konci silně klesá. Vysoká počáteční vlhkost znemožňuje nepřipustné přehřátí zboží, i když je počáteční teplota zboží vysoká a postupně stále klesá.

U souproudového sušení není možno počítat s vysokým stupněm dosoušení, je však výhodné v případech, kde je suché zboží choulostivé na vysoké teploty.

Je-li uspořádání protiproudové stýká se mokré zboží s ochlazeným (odebranou vlhkostí nasyceným) vzduchem. Usušené zboží pak přichází do styku s čerstvým, horkým vzduchem. Toto uspořádání nelze použít, pokud je usušený materiál termolabilní. Naopak je výhodné tam, kde se musí dosoušet na malé konečné vlhkosti a kde vlhký materiál nesnáší velký tepelný náraz.

Při styku vzduchu o vysoké relativní vlhkosti s čerstvým chladným zbožím může stoupnout vlhkost vzduchu až na rosný bod, což má za následek srážení vody na povrchu materiálu. Aby se zabránilo této vážné závadě, má být zásadně teplota odcházejícího vzduchu t_2 alespoň o 5°C vyšší, než teplota rosného bodu.

Z hlediska přestupu tepla je protiproud vždy výhodnější než souproud. Při sušení však jde rovněž o přestup hmoty, takže je třeba proces posuzovat i z této stránky. V některých případech, o nichž bude řeč později (rozprachové sušení) je výhodnější právě souproud. Zásadně lze říci, že v oblasti konstantní rychlosti

sušení, kde povrchová teplota zboží se rovná teplotě vlhkého teploměru, nezáleží prakticky na tom, je-li použito souproudu nebo protiproudu.

Jde-li v sušárně převážně o proudění příčné, kde pohyb vzduchu je kolmý k pohybu zboží (jako je tomu u většiny výkonných tunelových sušáren) je zřejmé, že jak čerstvé, tak i usušené zboží musí být odolné vůči vysokým teplotám sušícího prostředí a vůči intenzivní výměně tepla i hmoty.

Příčného proudění se užívá tam, kde tepelně ekonomické požadavky ustupují před nutností zkrácení procesu.

Použití recirkulace upotřebeného vzduchu a postupného ohřevu má stejné důsledky jako u periodických sušáren. Mísení je však složitější (Obr.2.12).

Je-li v zásadě rozhodnuto o způsobu proudění, je dalším úkolem upravit děj tak, aby všechny partie zboží byly sušeny rovnoměrně. K dosažení tohoto cíle musí být většinou provedena zvláštní konstrukční opatření týkající se zásahu do proudění, jako usměrňovací plechy, klapky atd. Ideálem by bylo, aby každé místo povrchu zboží bylo omýváno vzduchem stejnou rychlostí a stejným směrem. I když to je vyloučeno, lze upravit poměry tak, aby rychlost vzduchu v sušícím průřezu nevykazovala velkých odchylek. Poněkud příznivější poměry jsou v tomto případě u velkých sušáren malého výkonu.

Při posuzování kapacity sušárny je rozhodující doba, za kterou je usušena částice zboží v nejméně příznivých podmínkách. To znamená, že zařízení, které suší nerovnoměrně, pracuje méně hospodárně než sušárna, která má ve všech místech sušící komory podmínky sušení stejné.

Je-li jakost odvislá od konečného procenta vlhkosti, musí být rovnoměrnosti sušení věnována plná pozornost. Závady, plynoucí z nerovnoměrnosti sušení jsou např. tvoření povrchových trhlinek či deformace.

Průběh sušení je udržován v předepsaných mezích regulací. Regulace a udržování předepsaných parametrů je jednodušší u menších, periodicky pracujících sušáren, než u sušáren kontinuálních. Proto se těchto sušáren zatím užívá spíše k sušení jednodušších látek, v nichž se nevytváří vnitřní pnutí, které by vedlo až k porušení povrchu. Aby se zabránilo těmto jevům, zvyšuje se vlhkost vzduchu, zejména v posledních fázích procesu. Tím se však sníží i potenciál sušení, rozdíl vlhkostí uvnitř a na povrchu materiálu se zmenšuje, sušení se zpomaluje a trvá déle.

Ohřívání sušícího media se děje následujícími způsoby:

Na teplotu 40 - 170°C se ohřívá nejčastěji parou. Pro vyšší teploty se používá buď nepřímého ohřevu vzduchu kouřovými plyny nebo přímo směsí kouřových plynů se vzduchem, kde lze dosáhnout teplot 500 °C i více. Kouřové plyny vznikají spalováním uhlí, svítiplynu, nafty atd.

Elektrického, odporového ohřevu nelze používat běžně z ekonomických důvodů.

2.5 Autotest



1. Jak charakterizuješ dobu konstantní rychlosti sušení?
2. Podle jakých kritérií dělíme sušící zařízení?
3. Zakresli spotřebu tepla v teoretické sušárně do Molliérova diagramu.
4. Zakresli spotřebu tepla ve skutečné sušárně do Molliérova diagramu.
5. Popiš sušárnu s meziohřevem.

3 Sušárny

3.1 Sušárny surovin

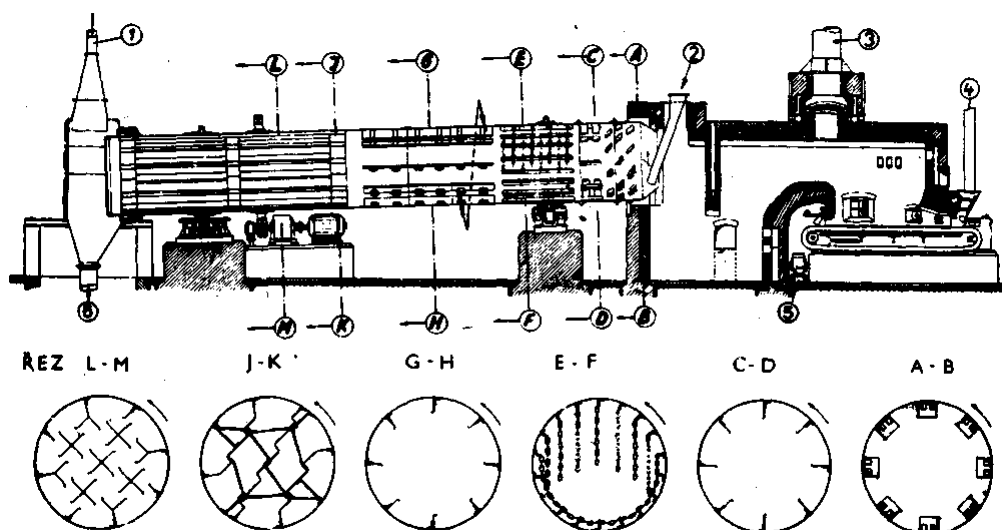


Sušení keramických surovin je součástí prakticky všech úpravářských procesů keramického průmyslu. Většinou se v posledních letech požaduje produkt práškový či zrnitý. Podmětem k tomuto požadavku bylo zvýšení produktivity práce (zvýšení výkonu, jakost usušené suroviny, úspora pracovníků, úspora zastavěné plochy a možnost mechanizace či automatizace provozu).

3.1.1 Bubnová sušárna

Je typickou kontinuální sušárnou s mechanicky promíchávanou vrstvou vysoušeného materiálu. Její uspořádání a provedení bývá různé a rozšířila se v průmyslu pro svoje univerzální použití, bezporuchový chod a poměrně dobrou tepelnou účinnost. Používá se pro sušení materiálů všeho druhu od kusového až po práškový.

Jejich hlavní součástí je ocelový válcový buben s mírně skloněnou podélnou osou kolem které se otáčí. Buben je uložen na nosných a opěrných kladkách. Je poháněn pomocí ozubeného věnce (spojeného s pláštěm přes pružné elementy, ke snížení záběrového momentu od pastorku a převodovky) Obr.3.1.



Obr. 3.1: Bubnová sušárna

- Legenda: 1 – odtah spalin s odlučovačem
 2 – podávání vlhkého materiálu
 3 – odtahový komín
 4 – přívod paliva
 5 – výstup usušeného materiálu

Vnitřek bývá zřídka prázdný, protože materiál by se stýkal se sušícím plynem jen na malé ploše. Pro zvýšení účinného dotyku opatřuje se buben nejrůznějšími vnitřními vestavbami, které se rozlišují způsobem upevnění, dráhou pádu sušených částic i množstvím materiálu, kterým lze zařízení naplnit. V zásadě se nejlépe osvědčují ty typy vestaveb, které materiál co nejlépe promíchávají, přesypávají a tím umožňují jeho dokonalý styk s plynem.

Vlhký materiál je vhodným dávkovacím zařízením, talířového, šnekového, pásového nebo vibračního typu, přiváděn vždy na vyšší stranu bubnu. Rotací, působením vestavby bubnu a prouděním sušícího prostředí postupuje složitým pohybem směrem k výstupnímu konci. V prostoru bubnu sdílí přítom sušící prostředí vysoušené látce teplo potřebné k ohřevu a odpaření vlhkosti, které je odváděno z bubnu sušícím prostředím.

Usušený produkt vypadává z nižšího konce do sběrné komory. Sušící prostředí, je z bubnu odtahováno odstředivým ventilátorem přes odlučovací zařízení, ve kterém se zachycují částice materiálu odnášené sušícím prostředím. Zvětší se tím podstatně povrch pro přestup tepla a hmoty. Částice vysoušeného materiálu se na dně bubnu dostávají za poměrně krátkou dobu opět dovnitř shluků, kde vyrovnávají úbytek své povrchové vlhkosti. Z hlediska sušení je tato okolnost velmi důležitá, protože se tím prodlužuje úsek stálé rychlosti sušení. Přesypáním náplně se omezuje i nerovnoměrnost rozdělení teplot v částicích a ve shlucích, takže nepříznivý vliv konvektivních sil na průběh sušení se dá zanedbat. Vysoušení sypkých materiálů v bubnové sušárně se tak blíží svým charakterem vysoušení jednotlivých granulí. Neuplatňují se proto větší měrou vnitřní podmínky sušení, které tak ustupují svým vlivem podmínkám vnějším.



Obr. 3.2: Bubnová sušárna (Zdroj www.engext.ksu.edu)

3.1.2 Pásová sušárna

Ve většině oborů keramiky se připravují hmoty mokrou cestou. Podstatná část vody z hmoty se odstraňuje mechanicky v kalolisech. Je však třeba odstranit přebytečnou vlhkost z kalolisových placek, která je ještě asi 30 %. Tvar placky není vhodný k progresivnímu sušení. Úprava tvaru se prováděla různými způsoby, např. rozřezáváním placek na menší kusy nebo se zpracovávaly na více-děrové cihly. Sušení se provádělo v kanálových sušárnách, kde placky či cihly byly uloženy na vozících. Sušilo se na zbytkovou vlhkost 10 - 12 % při spotřebě tepla 6500 kJ.kg^{-1} .

Nahradí-li se dopravní vozíky u tunelové sušárny pásem z drátěného pletiva, který se nepřetržitě pohybuje v uzavřeném okruhu tunelem, vznikne pásová sušárna. Způsobem práce se velmi podobá tunelové sušárně.

Pro zlepšení sušících podmínek bylo však nutno upravit sušenou hmotu na co nejvýhodnější tvar. Bylo prokázáno, že pro podmínky sušení na pásu je nejvýhodnější tvar válečků o průměru 4 - 16 mm a délky 40 - 60 mm, protože mají příznivý poměr mezi povrchem a objemem a dají se z kalolisových placek kontinuálně vyrábět v síťových hnětačích – nudličkovačích.



Obr. 3.3: Pásová sušárna (Zdroj www.al-mo.cz)

Na Obr.3.4 je schéma třípásové sušárny stavebnicové konstrukce. Sestává z několika navzájem spojených sušících komor. Jejich počet je odvislý od požadovaného výkonu sušárny. Na začátku a konci jsou vratné a poháněcí stanice a na výstupu usušeného materiálu chladicí komora.

Rozřezané kaolinové placky jsou shromažďovány v tříkomorovém podavači, který tvoří určitou předzásobu materiálu.

Dále pak jsou podávány do nudličkovacího stroje, který zpracovává placky na nudličky. Kromě této funkce zajišťuje nudličkovací stroj stejnoměrné rozvrstvení materiálu na dopravních pasech. Výkon nudličkovače je měnitelný.

Nudličky dopadají na horní nerezový drátěný pás sušárny, který je tažen po obou stranách válečkovými řetězy. Pás prochází sušícími komorami a předává na svém konci předsušené nudličky za současného převrstvení na střední pás, který leží pod ním a pohybuje se opačným směrem.

Tento proces se opakuje při přechodu z druhého na třetí pás. Každý pás má svůj samostatný pohon s možností plynulé regulace. Rozdělením doby průchodu v sušícím pásmu na tři nezávislé časové intervaly získáváme možnost přizpůsobit průběh sušení optimálnímu stavu. Základní rychlosti pasů jsou v poměru 4:3:2.

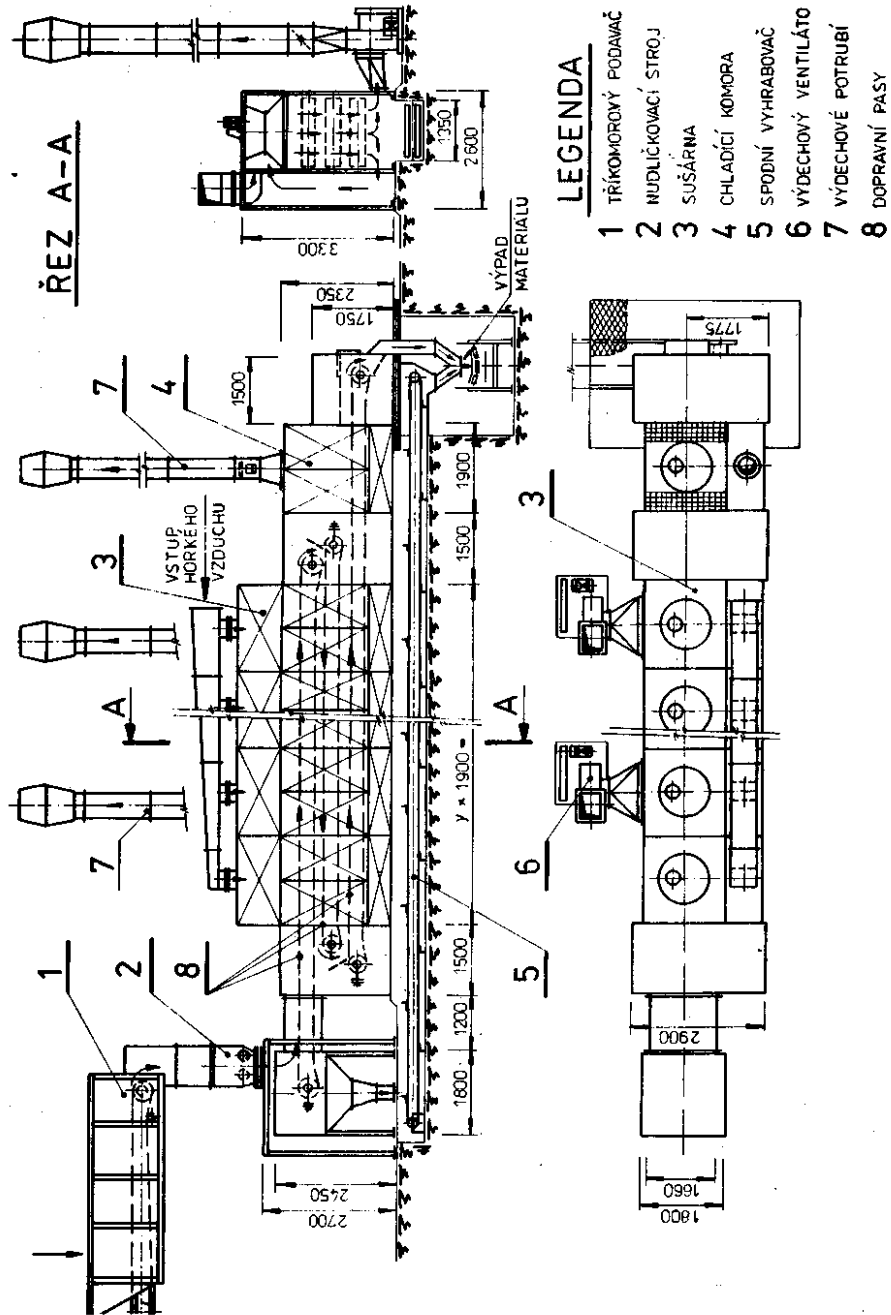
Sušící vzduch v jednotlivých komorách cirkuluje příčně pomocí axiálního ventilátoru, který je instalován na stropě sušárny. Horký vzduch je přiveden před uvedený ventilátor, kde se mísí s cirkulačním vzduchem.

Vlhký vzduch je z prostoru pod pásy odsáván radiálním ventilátorem do volné atmosféry.

Celé těleso sušárny je obloženo izolačními panely z ocelového plechu, které jsou vyplněny deskami z čedičové vlny (Obr.3.3).

Výstup ze sušárny je opatřen chladicí komorou, která usušené kaolinové nudličky ochlazuje na potřebnou výstupní teplotu.

Pro odstranění propadlého materiálu je pod pásy instalován spodní vyhrabovač.



Obr. 3.4: Pásová sušárna

Měrná spotřeba tepla je závislá na požadavku zbytkové vlhkosti. Například u kaolinu s požadovanou výstupní vlhkostí 10 % je nižší než 3600 kJ.kg^{-1} . Teplo je přiváděno horkým vzduchem, kdy teplota oběhového vzduchu v sušárně je asi 250°C a výstupní teplota je kolem $60 - 65^\circ\text{C}$. Při požadované nižší výstupní

vlhkosti se měrná spotřeba tepla zvyšuje a rovněž se zvyšuje i teplota sušícího vzduchu.

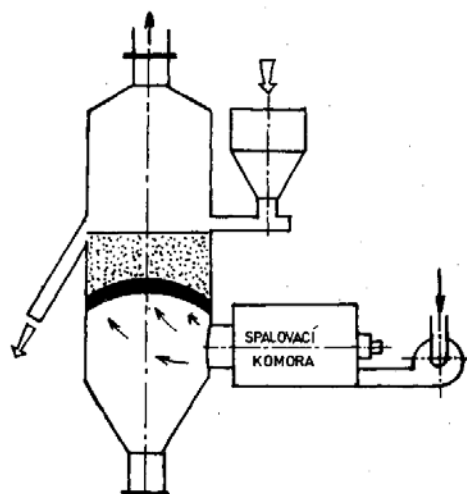
Sušící medium o potřebné teplotě lze získat nejrůznějšími způsoby. Teplý vzduch může být získán z kaloriferů vytápěných parou, nebo horkou vodou. Využit lze chladící vzduch z tunelové pece, případně spalin či elektrické energie. Je-li použito k sušení spalin, lze je získat ve spalovací komoře otápené plynem či topným olejem. Spaliny ze spalovací komory jsou nasávány do směšovací komory, kde jsou míseny s venkovním vzduchem na potřebnou provozní teplotu (asi 250 °C). Horký vzduch je prostřednictvím vstupního ventilátoru vháněn do jednotlivých komor sušárny.

Odpařivost je u této sušárny vysoká. Dle velikosti sušárny lze odpařit za hodinu u malých sušáren 500 kg vody, u velkých více než 1000 kg vody.

Velká zařízení pracují ekonomičtěji než malá. Pásová sušárna pracuje automaticky. Sušení probíhá nepřetržitě a potřeba tepla je automaticky řízená pomocí měřiče vlhkosti umístěného na výstupu. Pro kontrolu jsou na vhodných místech umístěny teploměry. Sušárna vyžaduje minimální obsluhu a u dobře seřízené vystačí se pouze s občasným dozorem. Z tohoto důvodu je opatřena také registračními přístroji zapisujícími teploty a vlhkost.

3.1.3 Fluidizační sušárny

U tohoto typu sušáren se profukuje vzduch (obecně sušící plyn) vrstvou zrnitého materiálu takovou rychlostí, že dochází k nadzdvihování jednotlivých částic. Nakypřením celé vrstvy a obalením jednotlivých zrn plynem dochází ke značnému zmenšení vzájemného tření, takže podobně jako u fluidního dopravního žlabu dochází k pohybu materiálu po podloží i jen málo nakloněném.



Obr. 3.5: Fluidizační sušárna

V provozu moderních závodů mají význam především sušárny pracující kontinuálně. Konstrukční provedení je znázorněno na Obr 3.5 Jednodušší sušárna fluidizační používá k sušení spalin. Je vhodná jen pro takové zboží, jehož ja-

kost neutrpí značně rozdílnou dobou, po kterou se jednotlivé částice zdržují v sušící komoře.

Teprve v poslední době se používají fluidní sušárny i pro sušení termolabilních látek. Rovnoměrnost fluidního lože a zamezení nežádoucího promíchání zrn se dociluje systémem hradítek a příček, které mohou být přestavovány i automaticky, jako součást řídicího systému.

3.1.4 Proudové sušárny

Při sušení látek snadno unášených proudem plynu, tj. zejména drobnozrnných až práškovitých a vláknitých, je možné použít horkého plynu, který materiál současně dopravuje sušící komorou, mající v podstatě tvar vertikální trouby.

Rychlost plynu musí být větší, než je rychlost pádu jednotlivých částic. Rozdílem obou rychlostí, který proti pneumatické dopravě nemá být příliš velký, pohybují se částice směrem vzhůru a suší se tak ve vznosu.

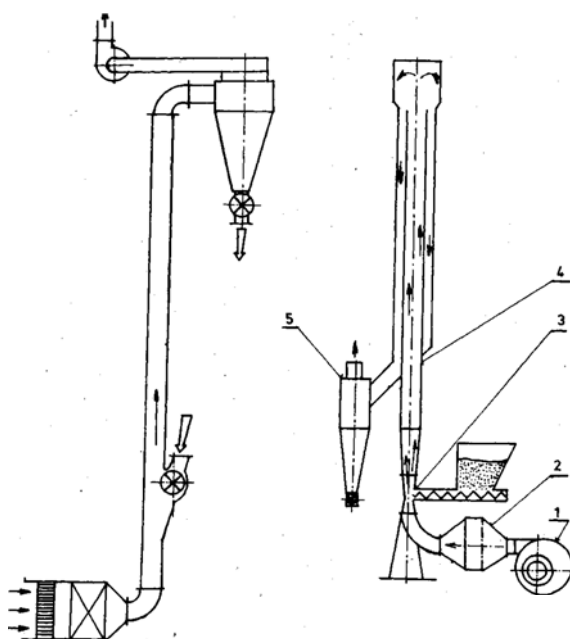
Rychlost sušícího plynu závisí na rozměrech a měrné hmotnosti materiálu a pohybuje se v rozmezí od $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro lehká tělíska vláknitého tvaru až do $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro materiál hrubšího zrna (např. uhlí 30 mm). Čím je větší zrno, tím musí být i vyšší rychlost. Suší-li se netříděný materiál o různé velikosti zrna, je tato skutečnost výhodná, protože větší kousky, potřebující delší dobu k usušení, setrvávají v proudu delší dobu.

Velká celková plocha sušeného zboží - vzhledem k malým rozměrům částic - velké součinitele přestupu tepla i hmoty způsobují, že doba sušení jemnozrnných látek může být snížena až na několik sekund. Souproudový způsob práce kromě toho snižuje i nebezpečí přehřátí na konci sušení, takže se proudové sušárny výborně hodí pro sušení termolabilních i hořlavých látek.

Naproti tomu je během tak krátké doby možné z materiálu odstranit jen volnou vodu, protože v úseku konstantní rychlosti sušení je možné rychlost procesu ovlivnit převážně vnějšími podmínkami. U látek obsahujících vyšší množství vody vázané, které vyžadují delší čas zejména na konečnou fázi dosoušení, musí být počítáno s vrácením sušených částic, případně i se dvou a více stupňovým sušením. Pro řadu látek nejsou z tohoto důvodu proudové sušárny vhodným typem.

Princip proudové sušárny v nejjednodušším provedení je naznačen na Obr.3.6 Čerstvý vzduch, nasátý přes filtr, je hnán ventilátorem přes ohřivač do sušící trouby, kde se do jeho proudu vhodným zařízením vmísí materiál. Upotřebený plyn se od usušeného zboží oddělí v odlučovačích, často pro vyšší účinnost čištění, zapojených v různém provedení za sebou.

Nejintenzivněji probíhá proces sušení v prvních 2 - 4 m dráhy, kdy je největší potenciál sušení. S postupným snižováním teploty a zvyšováním vlhkosti sušícího plynu se tento potenciál rychle zmenšuje, protože proces je čistě souproudý.



Obr. 3.6: Proudová sušárna

Legenda: 1 – ventilátor

2 – zahřívání vzduchu

3 – Venturiho trubice s podávacím zařízením

4 – sušící potrubí

5 – odlučovač

3.1.5 Rozprachové sušárny

Základem sušení rozprašováním je vytvoření silně dispersního stavu sušené látky v sušicím prostředí o vysoké teplotě. Zboží je rozprašováno přímo v sušicí komoře speciálním zařízením a do komory se současně vhná horký sušící plyn. Jemné kapičky zboží vytváří velký povrch, jímž se stýkají se sušicím plynem, takže výměna tepla i vlhkosti je neobyčejně intenzivní. Proto rychlost sušicího pochodu je větší, než u kteréhokoli jiného typu sušení (Obr.3.7).

Výhody rozprachového sušení

1. Rozprachová sušárna může v jediném zařízení získat přímo z roztoku nebo suspence konečný výrobek - prášek. Tento způsob sušení je schopen eliminovat, nebo alespoň zjednodušit další operace, jako např. filtraci, mletí suchého materiálu, případně i odpařování, nejedná-li se současně o důvody ekonomické. Při použití vyšších teplot sušicího plynu může být sušicí komora, vyzděná ohnivzdorným materiálem, použita nejenom k sušení, ale i k současně probíhajícím chemickým pochodům.
2. Rozprachové sušení je šetrné vůči termolabilním látkám. Proces totiž proběhne v době nejvýše několika málo sekund, takže i při použití vysokých počátečních teplot sušicího plynu nemohou ve fyzikálních ani chemických vlastnostech sušeného zboží nastat závažné změny. V období klesající rych-

losti sušení, kdy teplota povrchu materiálu stoupá je už teplota sušícího plynu natolik snížena, že přehřátí nemůže nepříznivě působit.

3. Sypná hmotnost výrobku může být stále kontrolována a do určité míry ovlivňována i během provozu. Toho lze dosáhnout zejména změnou teploty a koncentrace sušené látky, změnou parametrů sušícího plynu atd.
4. Použije-li se jednotek o vysoké kapacitě, klesají investiční náklady na jednotku výrobku rychleji než u jiných typů sušáren, zejména jedná-li se o dosušení na malé procento vlhkosti. Při zvyšování výkonu se totiž mění prakticky jen rozměr sušící komory.
5. Kromě malých rozprašovacích elementů se vlhký materiál nestýká s žádnou konstrukční plochou. To neobyčejně usnadňuje volbu konstrukčního materiálu s ohledem jak na ochranu výrobku, tak i na korozi zařízení.

Nevýhody rozprachového sušení

1. Investiční náklad je vyšší než u jiných typů sušáren, zejména pro malé až střední kapacity. Příčinou toho jsou velká vzduchotechnická zařízení, velká spotřeba síly pro pohon některých typů rozprašovačů a odlučovače prášku.
2. Malá sypná hmotnost výrobku vyžaduje v některých případech větší skladovací prostor. Převazuje-li se jako volně ložené zboží, práší. Tato nevýhoda však pro většinu druhů výrobku nepřichází vůbec v úvahu.
3. Látka určená k sušení se musí do rozprašovacího zařízení dopravovat čerpadly. Je-li příliš hustá pro čerpání, musí se uměle zředovat. V takových případech je nutno na rozdíl od jiných typů sušáren výkon zařízení zvyšovat.
4. Čištění odcházejícího plynu vyžaduje nákladné zařízení, tj. filtry, cyklony, elektrostatické odlučovače atd., které investičně i provozně zařízení zdražují.
5. Univerzálnost zařízení je v porovnání s běžnou sušárnou omezena, protože mohou být sušeny jen látky podobných fyzikálních vlastností. Jednoduchou úpravou rozprašovacího zařízení se však může použitelnost značně rozšířit.

Sušit lze prakticky všechny tekuté a téměř všechny kašovité i silně viskózní látky.

Pochod rozprašovacího sušení lze rozdělit do tří hlavních operací:

- Rozprášení sušené látky
- Vlastní sušení
- Odloučení prášku od sušícího plynu.

3.1.5.1 Způsoby rozprašování

Mechanické rozprašování tlakovými dýzami je nejstarší, dodnes používaný způsob, který má řadu výhod. Kapalina, dodávaná do rozprašovací dýzy, vstupuje do rozprašovacího prostoru tangenciálně, čímž dosáhne prudké rotace, která se udržuje i po výstupu do komory. Látka nejprve vytvoří film tvaru kuželové plochy, který se v zápětí rozpadne na jednotlivé kapičky. Tlakové dýzy nejsou vhodné pro rozprašování silně viskózních suspenzí a kapalin, stejně

jako roztoků třeba řídkých, ale s tendencí sedimentovat. Spotřeba mechanické energie je malá, nejmenší ze všech tří používaných způsobů. Je jí zapotřebí jen k pohonu čerpadla, jehož příkon je relativně velmi malý.

Pneumatické rozprašování používá dvojsložkové dýzy rozprašuje mokré zboží pomocí plynného média. Dle konstrukce rozdělujeme tyto rozprašovací elementy na dýzy s vnitřním a vnějším rozprašováním.

Poznámka

Dýza je úzká trubice, která se používá ke zvyšování výtokové rychlosti tekutin, tryska.



Dýza s čistě vnitřním rozprašováním je nevýhodná proto, že kapky na vnějším okraji rozptylového kužele mohou být značně velké, takže rozprašování je nejednotné.

Naproti tomu je vnější, nebo kombinované směšování velmi stejnoměrné, protože zrychlení kapaliny způsobené rychle proudícím plynem (vzduchem) je příčinou dobrého promísení a vytvoření mlhovitého aerosolu. Výhodou dvojlátkových dýz je možnost docílit změnou tlaku vzduchu různé velikosti kapiček a tím různého množství sušené látky.

Pro případ náhlého vysazení dodávky vzduchu je nutno provést opatření proti možnosti vtékání nerozprašené látky do sušicí komory.

Odstředivé rozprašování se používá tak, že kapalina celkem volně teče na kotouč různé konstrukce, rotující vysokými otáčkami. Konstrukce kotouče závisí hlavně na rozprašované látce a její viskozitě a na tom, zda jde o kotouč zavěšený nebo podepřený.

Odstředivé rozprašovací kotouče jsou vhodné zejména pro suspence a pasty, které by dýzy ucpávaly, nebo korodovaly. Velikost kapek se málo mění s množstvím.

3.1.5.2 Sušení materiálu

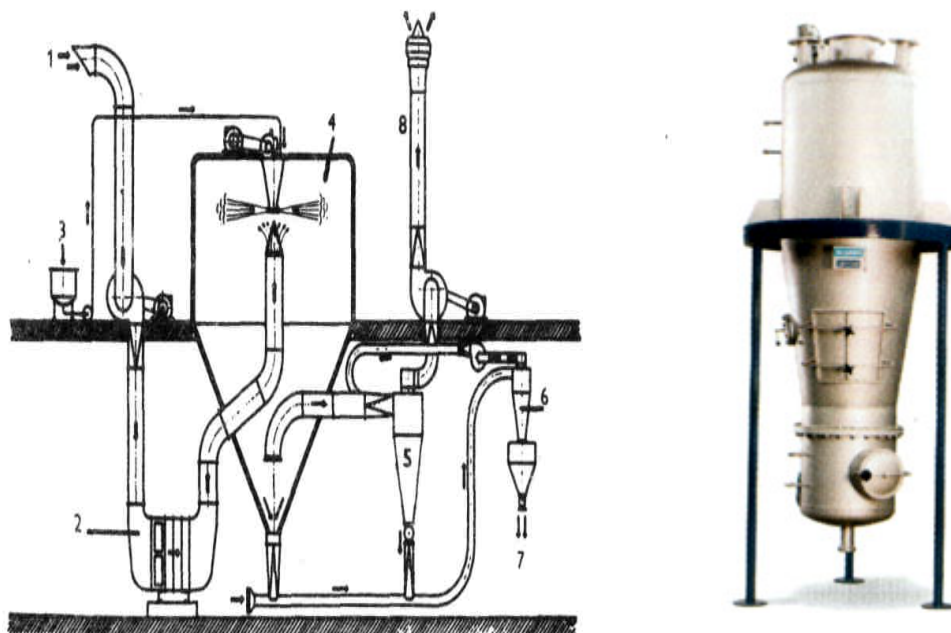
Vysušení materiálu závisí především na rozdělení volné a vázané vody. V rozprachových sušárnách se obvykle suší na 1 - 5 % konečné vlhkosti. Dosušení na nižší procento (např. 0,5 %) by znamenalo prodlužování sušicí doby a zvýšenou spotřebu tepla. Spotřeba tepla je vůbec slabinou těchto sušáren. Aby se měrná spotřeba tepla q snížila, doporučuje se zvyšovat co nejvíce vstupní teplotu sušicího média, jak jen zboží dovolí. Není-li zboží termolabilní, je omezujícím činitelem jen materiál sušárny.

Vysoká teplota plynu podporuje vytváření dutých tělísek, které mají nízkou sypnou hmotnost. Pokud potřebujeme docílit výrobku s vysokou sypnou hmotností, je výhodné použít protiproudu.

3.1.5.3 Odlučování prášku od sušicího plynu

K odlučování prášku od vzduchu se používá filtrů a cyklonů, ve zvláštních případech i praček vzduchu. Aby bylo docíleno vyšší účinnosti odlučování, řadí se někdy odlučovače i za sebou.

Pokud se používá filtrů bez předřazených cyklonů, jde o menší jednotky. Filtry jsou nejčastěji hadicové, přičemž se ulpělý prášek z vnitřní strany filtru odstraňuje setřásáním (horní část se oklepává excentrem) nebo sfoukáváním.



Obr. 3.7: Rozprachová sušárna (Zdroj www.al-mo.cz)

- Legenda: 1 – Přívod studeného vzduchu
 2 – Zahřívání vzduchu či spalovací komora
 3 – Podávání materiálu
 4 – Rozprašovací kotouč
 5, 6 – Odlučovače
 7 – Odběr usušeného materiálu
 8 – Odtah vlhkých spalin

3.2 Sušárny výrobků



Provedené rozdělení sušáren a sušících způsobů v kapitole 2 je obecně platné. V průmyslu výroby stavebních hmot a keramiky se však v současné době ustálilo používání určitých typů sušáren a to podle toho, zda jde o sušení hmot či výrobků. Základním hlediskem je zde ekonomika a kontinuální výroba.

Protože v našich závodech je ještě v provozu řada starších typů sušáren, uvedme si principy některých z nich.

Dle zdroje tepla dělí se sušárny na dvě základní skupiny:

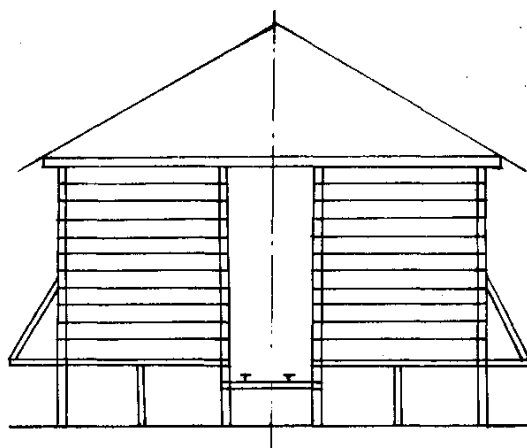
- sušárny přírodní
- sušárny umělé

3.2.1 Sušárny přírodní

V dřívějších dobách se tento typ sušáren používal při výrobě cihel, krytiny a drenážních trubek. Přestože se jedná o prakticky již nepoužívané typy sušáren, lze z následujícího přehledu usoudit na vývoj. Sušení probíhalo na pláních v kůlnách a Kellerových sušárnách.

Kellerova sušárna

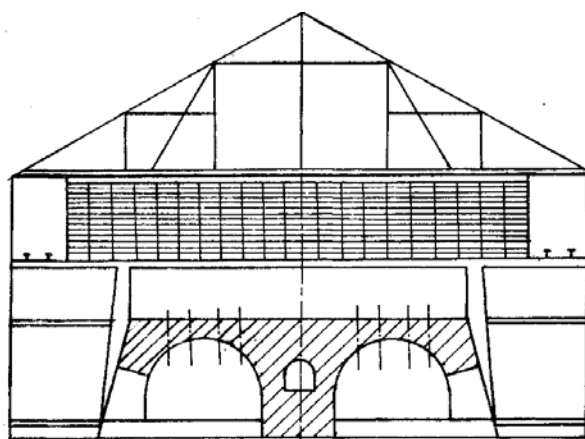
Tato sušárna má řešeno zavážení a vyvážení pomocí vozíků - Kellerův systém. K sušení se využívá větru. Osa komor byla proto situována ve směru převládajících větrů. Protože sušení probíhá při nízkých teplotách, je spotřeba vzduchu na 1 kg odpařené vody vysoká. Tím je důležitější maximální využívání větru pro intenzivní výměnu vzduchu mezi výrobky. Výkon se udával v tzv. obrátkách sušárny, což znamená kolikrát je možné během sezóny vyměnit náplň sušárny. U přírodních sušáren se počítalo v průměru 6-11 obrátek ročně.



Obr. 3.8: Kellerova sušárna

Nadpecní sušárna

U tohoto typu sušárny je využíváno teplého vzduchu a sálavého tepla v prostoru nad pecí, v níž se výrobky vypalují. Představují přechod mezi sušárnami přírodními a umělými. V pozdější době byly tyto sušárny rozděleny na komory kam se přivádělo teplo získané z chlazení vypáleného zboží nebo byly také komory opatřeny topnými registry, které měly v zimním období umožnit zachování doby sušení z letního období. Doba sušení se zde pohybovala v rozmezí 4-10 dnů.



Obr. 3.9: Nadpecní sušárna

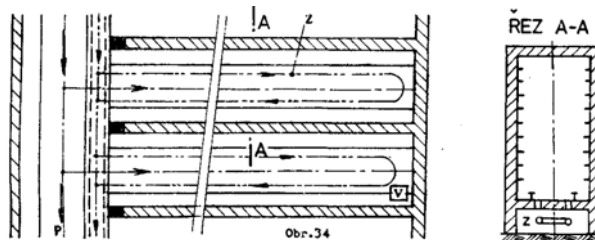
3.2.2 Sušárny umělé

V současné době se používají výhradně sušárny umělé pracující s tlakem atmosférickým nebo blízkým atmosférickému tlaku. Tyto sušárny v důsledku vývoje doznaly značných změn. Jejich činnost bývá jak periodická, tak i kontinuální.

3.2.2.1 Kellerova komorová sušárna

Vznikla z přírodní sušárny oddělením jednotlivých komor stěnami. Zdrojem tepla byla obvykle pára, která přes topné registry - zahříváče ohřívala vzduch v sušárně. Výměna vzduchu v komorách byla pouze přirozeným prouděním. Doba sušení proto byla u cihlářských výrobků obvykle delší než 120 hodin. Je to sušárna periodická.

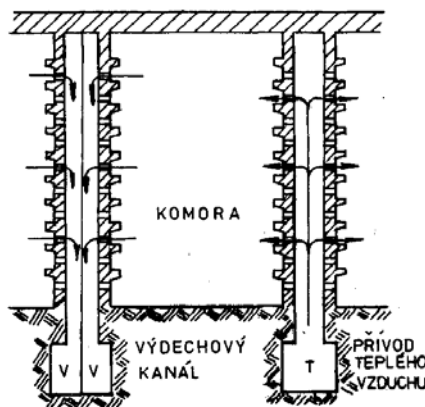
Intenzitu sušení (odpařivost) bylo možno regulovat dodávkou tepla do zahříváčů. Vzduch v tomto případě není přímým nositelem tepla. Účinnost těchto sušáren byla proto malá.



Obr. 3.10: Kellerova sušárna

3.2.2.2 Buhrerova komorová sušárna

Je charakteristická vedením sušícího media napříč komorami. Příčky rozdělující jednotlivé komory jsou duté a jsou střídavě napojeny na kanál sušícího media a kanál pro odvod nasyceného media (kanál výdechový). Původní konstrukce s jednoduchým vedením byla z důvodů zvýšení výkonu a dokonalejšího využití tepla sušícího media nahrazena dvojitým vedením media. V tomto případě se vzduch nasycený částečně vodou neodvádí do ovzduší, ale převodovým kanálem do jedné z komor zavezené čerstvými výrobky. Na výšku komory se projevují značná teplotní rozdíly. Spotřeba tepla a doba sušení je v průměru jen o málo menší než u sušárny Kellerovy.



Obr. 3.11: Buhrerova sušárna

3.2.2.3 Geigerova komorová sušárna

Vyznačovala se podélným vedením vzduchu v komorách. Výkon byl však malý v důsledku nízkého využívání tepla. Poslední typy byly řešeny s postupným vedením sušícího vzduchu. Teplý vzduch vstupoval napřed do lichých komor, kde výrobky byly ve fázi dosoušení. Po průchodu těmito komorami se převodním kanálem převede do sudých komor, kde jsou čerstvé výrobky. Po projití těmito komorami je odsáván ventilátorem do výdechu. Sušárna je podtlaková. Vzduch je uváděn do pohybu sacím účinkem ventilátoru, umístěným na výdechu sušárny. I u této sušárny se vyskytují nerovnoměrnosti v rozdělení teplot na výšku i šířku komor. Nebyla proto vhodná na sušení výrobků citlivých na sušení a tenkostěnných výrobků.

3.2.2.4 Dannenbergova komorové sušárna

Zde bylo použito poprvé vertikálního proudění sušícího media. Pracuje obvykle jako přetlaková, aby se vyloučily ztráty netěsnostmi vlivem falešného vzduchu. Byly konstruovány jak s jednoduchým, tak i dvojnásobným vedením sušícího media. Jejich nedostatkem byla nerovnoměrnost sušení, velká spotřeba elektrické energie a malá účinnost.

Společným nedostatkem výše popisovaných sušáren byla malá účinnost, vysoká spotřeba tepla a dlouhá doba sušení.

Všechny uvedené typy sušáren umělých s výjimkou Kellerovy pracují s ohřevem sušícího media mimo sušící komory. Sušení bylo málo jakostní. Snaha odstranit tyto nevýhody se současnou možností regulace průběhu sušení dala podnět ke vzniku sušáren s oběhem sušícího media, případně se současným přehříváním v komorách. Nejrozšířenějším typem se stala sušárna Altnerova.

3.2.2.5 Altnerova komorová sušárna

Pracuje s horizontálním vedením sušícího media. Komory jsou spojovány do dvojic, které jsou vybaveny ventilátorem pro oběh sušícího media a zahříváči.

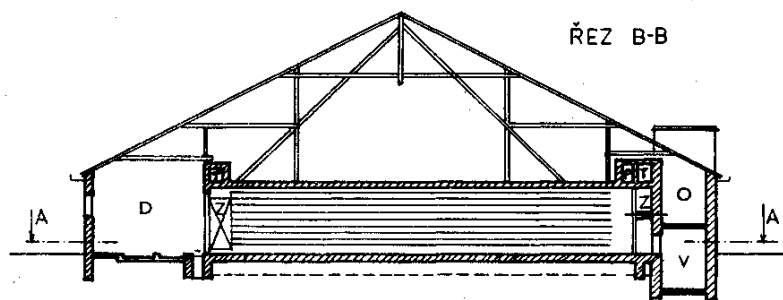
Sušící medium postupuje komorami rychlostí $1 - 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a po nasycení vodou se odvádí soustavou otvorů uzavíratelnými hradítky a soustavou kanálů do ovzduší nebo do komor zavezených čerstvými výlisky, kde je možno ještě media se sníženou sušivostí využít. Teplo k sušení se dodává jednak zahříváči vytápěnými nízkotlakou parou nebo horkým vzduchem z chladicího pásma pece. Zahříváče jsou děleny na 2 - 3 samostatně uzavíratelné stupně k umožnění regulace.

V prvním údobí se vzduch s nízkou sušivostí pouze vyměňuje. Voda se z výrobků odpařuje minimálně a výrobky se prohřívají do hloubky. Toto údobí končí zhruba při dosažení teploty $40 - 45^\circ\text{C}$. Pak nastává vlastní sušení a odpařování vody. Odpovídající maximální dovolené rychlosti sušení. Po dosažení kritické vlhkosti nastává poslední údobí. Na výrobky se přivádí intenzivně teplo z pecí a všechny stupně zahříváčů jsou otevřeny na maximum. Doba sušení se pohybuje dle druhu výrobků 2 - 4 dny.

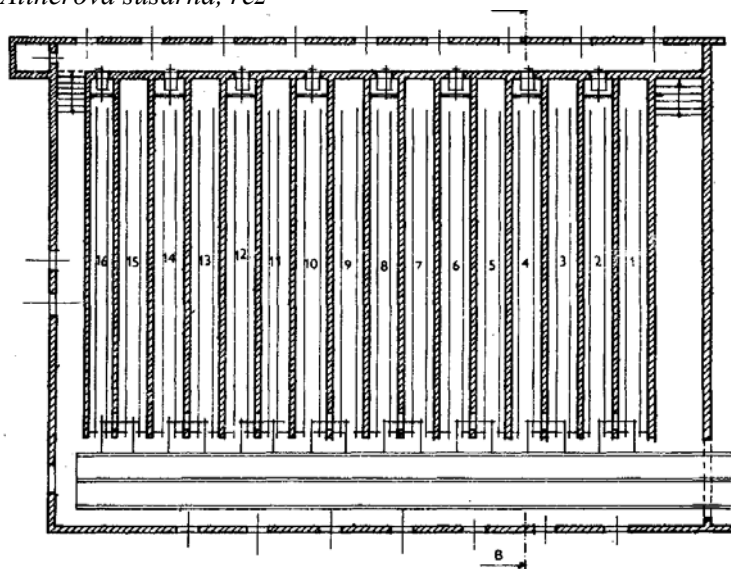
Altnerovy sušárny se stavěly jednak neprůjezdné (zavážení i vyvážení výrobků se provádělo z dopravní chodby). Jednak se stavěly také průjezdné. Zavážení a vyvážení výrobků se provádělo ze samostatných dopravních chodeb.

Ve své době doznal tento typ sušáren u nás značného rozšíření. Jejich nevýhodou však bylo, že výrobky umístěné hned za zahříváčem ve směru proudění sušícího media jsou nejvíce tepelně namáhány a proto také nejdříve usušené. Na výměnu výrobků se však muselo čekat až vyschnou poslední řady výrobků sušené vzduchem částečně nasyceným vodou. Tím se doba sušení prodlužovala a výkon sušárny klesal. Čím byly komory delší, tím více se poměry zhoršovaly. Rovněž u vysokých komor nebylo možné vyloučit rozdíly teplot na výšku komory.

Uvedené problémy, spojené s postupným sušením výrobků v oběžných sušárnách s jednosměrným směrem proudění sušícího media daly podnět ke konstrukci sušáren cirkulačních, reversních, ve kterých je směr oběhu v určitých intervalech měněn. Reverzace bylo docíleno různými způsoby.



Obr. 3.12: Altnerova sušárna, řez



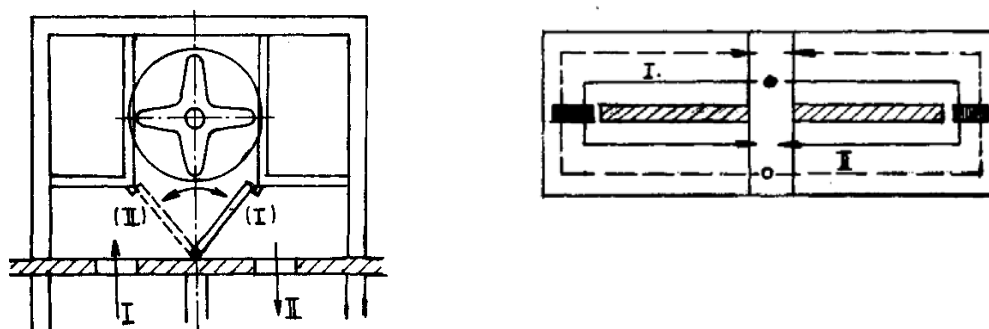
Obr. 3.13: Altnerova sušárna, půdorys

- Legenda: D - dopravní chodba
 O - obsluhovací chodba
 T - teplovzdušný kanál (přívod teplého vzduchu)
 V - výdechový kanál (odvod nasyceného vzduchu)
 Z - zahříváč
 P - převáděcí kanál

3.2.2.6 Komorová sušárna dle Ing. Běťáka

Výhoda tohoto řešení spočívala v tom, že bylo možno s poměrně malými náklady zabudovat jej do sušárny Altnerovy. Jde o vtipně řešenou soustavu klapek, umožňující reverzaci.

Funkce zařízení je patrná z Obr.3.14. Na obou stranách ventilátoru jsou osazeny kývavé klapky vystřídané tak, že jedna komora je spojena se sací stranou a druhá s výtláčnou stranou ventilátoru. Přestavením klapky do druhé krajní polohy spojí se bývalá tlačná komora se sací stranou a bývalá sací s tlačnou stranou ventilátoru. Tím se směr proudění v komorách změní při nepřerušném chodu ventilátoru.

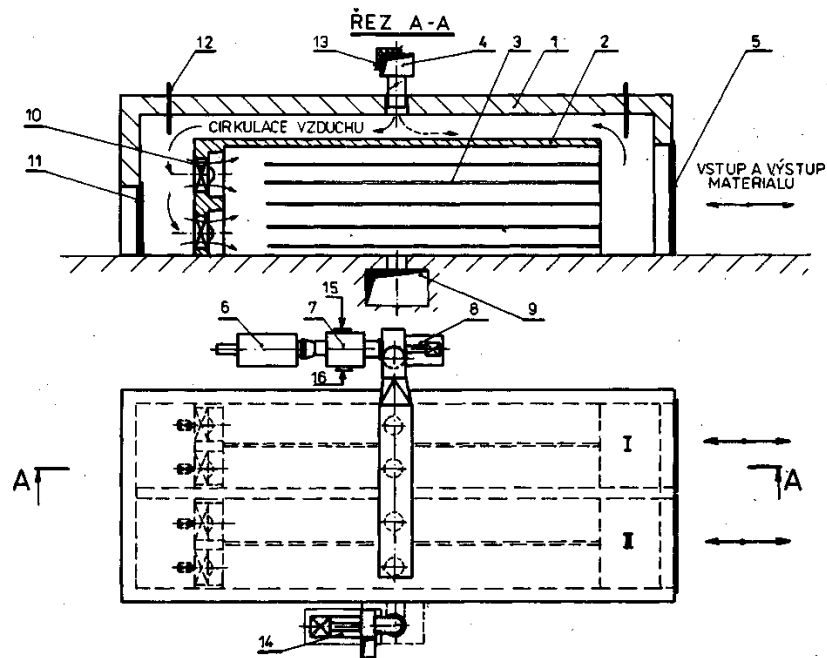


Obr. 3.14: Komorová sušárna dle Běťáka

Interval přestavování klapky lze nastavit časovým spínačem v rozmezí 0,5 - 30 minut. Touto reverzací se docílí zkrácení doby sušení až na 50 % času docíleného bez reverzace. Sušárny však musí být vybaveny dostatečným zdrojem tepla pro docílení požadované rychlosti sušení. Zvýšený příkon tepelné energie by zajistil zkrácení sušící doby i bez reverzace. Docházelo by však k poškození výrobků v důsledku překročení maximálního dovoleného koncentračního spádu.

3.2.2.7 Komorová reverzační sušárna

U tohoto typu sušárny je reverzace docílena změnou smyslu otáčení oběžného kola axiálního - osového ventilátoru a tím tedy i směru proudění sušícího média. Ukázalo se však, že tento způsob reverzace není příliš výhodný. Změnu směru otáčení nebylo možné provádět v kratších intervalech než 10 - 15 minut. Pro dobře vedené sušení by bylo potřeba reverzaci provádět v intervalu 1 - 5 minut. Mimo to při reverzaci vznikají dosti značné proudové nárazy v elektrické síti. Regulace byla prováděna pomocí časového spínače.



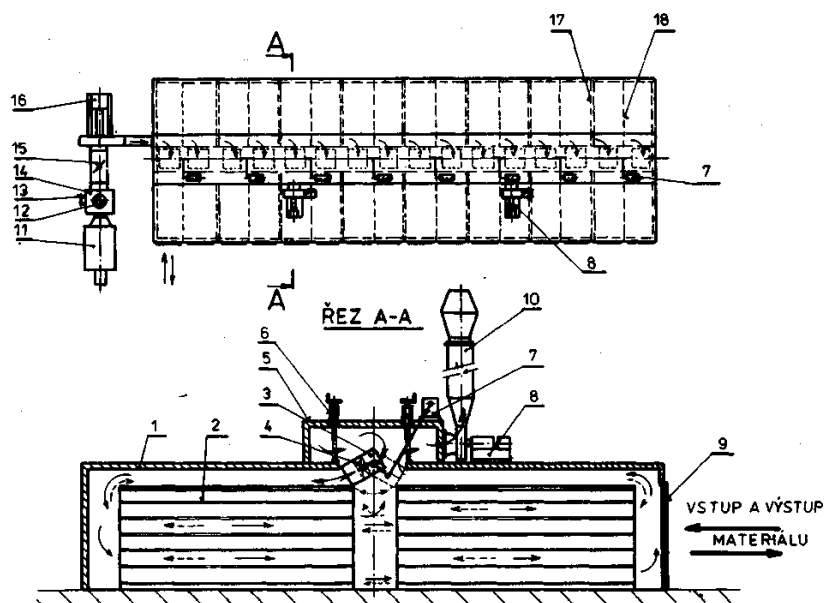
Obr. 3.15: Komerová reverzační sušárna

Legenda:

- | | |
|---|--|
| 1- Těleso sušárny | 10 - Cirkulační ventilátor |
| 2 - Úložné komory | 11 - Manipulační vrata (pro údržbu) |
| 3 - Etáže v komorách (nosné etáže) | 12 - Teploměry |
| 4 - Přívodní potrubí horkého vzduchu | 13 - Izolace potrubí |
| 5 - Vstupní vrata | 14 - Odtahový ventilátor vlhkého |
| 6 - Spalovací komora (případná dodávka tepla) | 15 - přívod horkého vzduchu od tunelových pecí |
| 7 - Směšovací komora | 16 - Směšovací vzduch z okolí |
| 8 - Vstupní ventilátor | I. komora |
| 9 - Odtahová šachta vlhkého vzduchu | II. komora |

3.2.2.8 Komerová reverzační sušárna s otočným ventilátorem

Odstranění nevýhod předchozího typu bylo docíleno uložením osových ventilátorů do otočného rámu. Otáčením se docílí změny směru proudění o 180° v poměrně krátkých intervalech. Změna je prováděna v intervalech ovládaných časovým spínačem. Přívod sušícího vzduchu a odvod nasyceného vzduchu se provádí klapkami, jejichž ovládání je automatické a je vázáno na změnu polohy ventilátoru. Sušárna je mimo to vybavena programovým zařízením pro automatickou regulaci teplot v komorách. Tento princip doznal značného rozšíření.



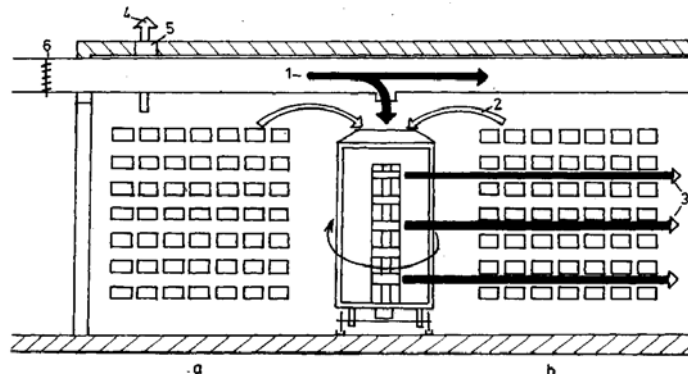
Obr. 3.16: Komerová reverzační sušárna

Legenda:

- | | |
|--|--|
| 1 - Těleso sušárny | 10 - Výdechové potrubí |
| 2 - Úložný prostor pro sušený materiál | 11 - Spalovací komora (náhradní zdroj tepla) |
| 3 - Klopný dvojuzávěr s cirkulačními ventilátory | 12 - Přívod horkého vzduchu od tunelových pecí |
| 4 - Cirkulační ventilátor | 13 - Směšovací vzduch z okolí |
| 5 - Přívodní rozvodný kanál teplého vzduchu | 14 - Směšovací komora |
| 6 - Regulační elementy | 15 - Regulační ústrojí |
| 7 - Servopohon pro naklápění uzávěří | 16 - Přívodní ventilátor teplého vzduchu |
| 8 - Odtahový ventilátor | 17 - Dělicí stěna mezi jednotlivými dvojkomorami |
| 9 - Vrata | 18 - Dělicí příčka uvnitř dvojkomory |

3.2.2.9 Komerová sušárna s rotomixery

V šedesátých letech Italové Marelli a Fagioli dosáhli velkých úspěchů při sušení výrobků citlivých na sušení. Zařízení vyvinuli původně pro velkoprostorové sušárny. Tento systém se nazývá také rytmické sušení. Princip spočívá v intenzivním, krátkodobém ofukování výrobků horkým vzduchem, po němž následuje období klidu. Při intenzivním ofukování po omezenou dobu lze vysoce překročit množství vody odnímané z povrchu vylisku daného limitní křivkou, protože v následujícím období klidu nastane vyrovnání obsahu vody mezi povrchem a středem vylisku.



Obr. 3.17: Komorová sušárna s rotomixery

- Legenda:
- 1 – teplý vzduch
 - 2 – cirkulační vzduch
 - 3 – směs teplého a cirkulačního vzduchu
 - 4 - výdech
 - 5 – regulační klapky
 - 6 - rotomixer

Rotomixer sestává z nahoře uloženého axiálního ventilátoru, který z jedné strany nasává vzduch z okolního prostoru sušárny a z druhé strany horký vzduch z přívodního kanálu. Obě množství vzduchu se promíchávají a s velkou rychlostí opouštějí nastavitelnými štěrbinami rotomixer, který se pomalu otáčí kolem své osy. Kroužící paprsek vzduchu ofukuje periodicky uložené výrobky. Velmi důležitý je pravidelný rytmus. Výrobky jsou pak krátkodobě ofukovány a mají dost času přizpůsobit se tepelným změnám před dalším nárazem teplého vzduchu. Řízení celého sušícího procesu se provádí pouze pomocí regulační klapky v přívodním horkovzdušném kanálu.

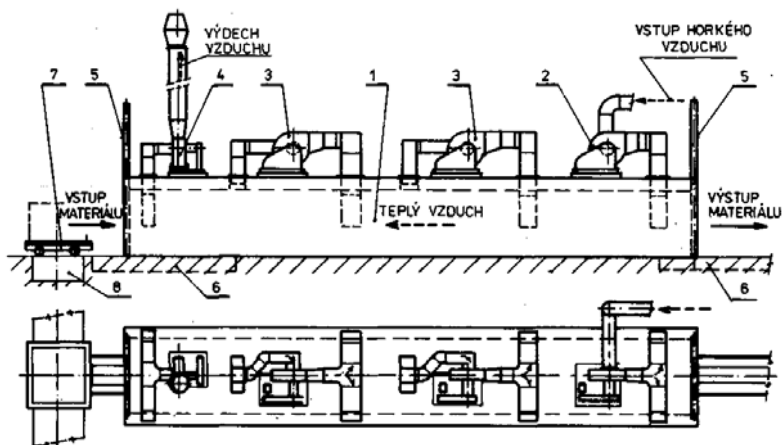
Tento typ sušárny prokázal zkrácení doby sušení dle druhu výrobků na 48 hodin až 24 hodin úsporu až 50 % zastavěné plochy a snížily se ztráty sušením.

Princip vyvinutý původně pro velkoprostorové sušárny se osvědčil i v sušárnách tunelových či kanálových. Vyznačuje se velmi dobrou regulovatelností a přizpůsobivostí jakékoliv surovině.

3.2.2.10 Kanálová (tunelová) průjezdná sušárna

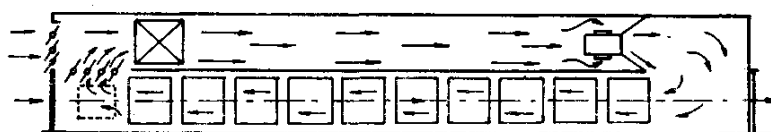
Tato sušárna pracuje kontinuálně a je průjezdná. Na rozdíl od sušáren komorových, kde jsou výrobky uloženy po celou dobu sušení na stejném místě, v sušárnách tunelových se pohybují tunelem uložené na vozících, závěsech či jiném dopravním zařízení. Pohyb dopravního zařízení může být fázový (po přítržích) nebo kontinuální (plynulý). Podél tunelu jsou rozmístěny ventilátory a zahříváče různých typů, jimiž lze upravovat teplotu, vlhkost i rychlost sušícího vzduchu.

U těchto sušáren může být použito protiproudového (Obr.3.19) nebo souproudového systému sušení, případně i jejich kombinace v jediném tunelu (Obr.3.20). V takto uspořádané sušárně není vzduch nikde dodatečně ohříván, takže za předpokladů platných pro teoretickou sušárnu by probíhala změna stavu sušícího vzduchu po čáře $i = \text{konst.}$

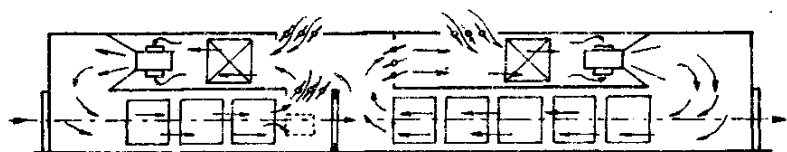


Obr. 3.18: Tunelová sušárna

- Legenda:
- 1 – těleso sušárny
 - 2 – vstupní ventilátor
 - 3 – cirkulační ventilátor
 - 4 – výdechový ventilátor
 - 5 – svislý uzávěr
 - 6 – hydraulický posunovač
 - 7 - sušárenský vůz
 - 8 - přesuvna

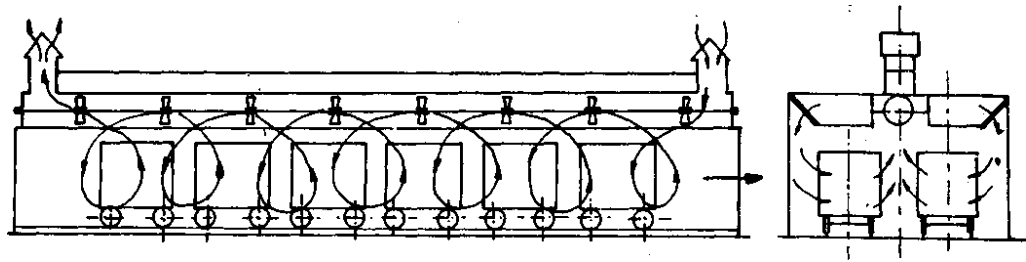


Obr. 3.19: Tunelová sušárna protiproudá



Obr. 3.20: Tunelová sušárna souproudá

Další možností je tzv. izotermické sušení, přičemž se jedná o kombinaci příčného proudu s protiproudem. Schématicky je taková sušárna naznačena na Obr.3.21. Jde vlastně o víceetapňové sušení s recirkulací vzduchu, přičemž je každý stupeň opatřen ventilátorem i zahříváčem. Parametry vzduchu pak mohou být dobře regulovány po celé délce tunelu.

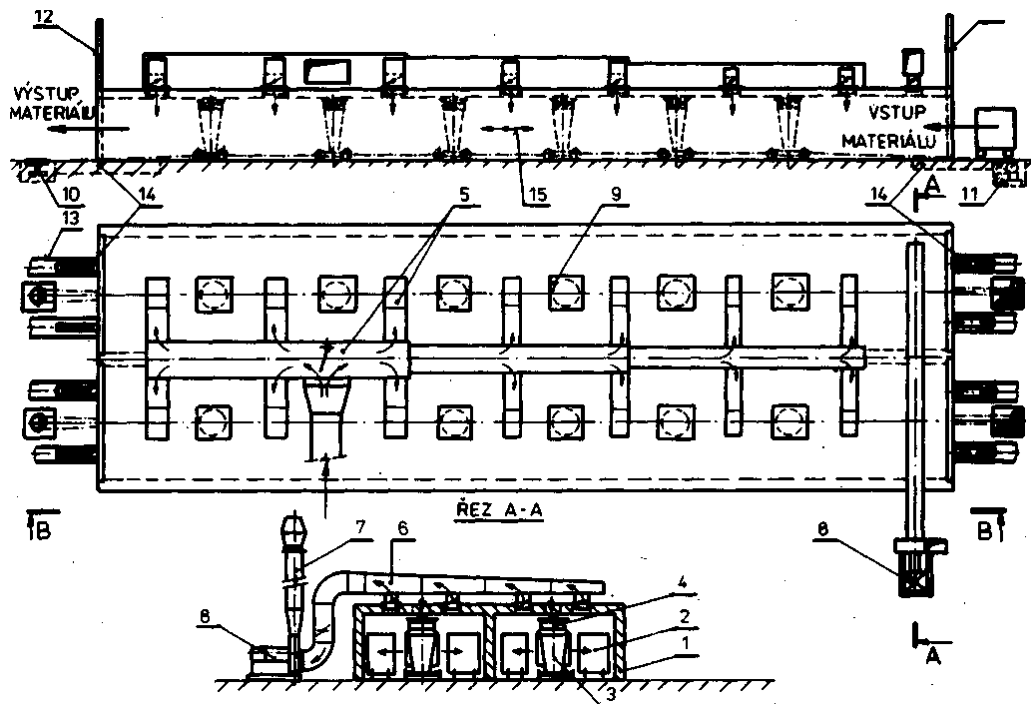


Obr. 3.21: Tunelová sušárna

Tunelových či kanálových sušáren bylo zkonstruováno mnoho typů. V souvislosti s nespornými výhodami rotomixeru byla navržena také kanálová sušárna s rotomixery.

3.2.2.11 Kanálová sušárna s rotomixery

Je to sušárna pracující kontinuálně - průjezdná.



Obr. 3.22: Kanálová sušárna s rotomixery

Legenda:

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1 - těleso sušárny | 6 - odtahové potrubí vlhkého vzduchu |
| 2 - vozík s materiálem | 7 - výdechové potrubí |
| 3 - rotomixer | 8 - výdechový ventilátor |
| 4 - ventilátor rotomixeru | 9 - Montážní poklop |
| 5 - vstupní rozvodné potrubí teplého vzduchu | 10 - vratná klapka pojezdu rotomixerů |

Na Obr.3.22 je znázorněna dvoukanálová sušárna, kde v každém kanálu na krajní koleje jsou zasouvány sušárenské vozy s výrobky. Na střední koleji pak v obou směrech pojíždějí ventilátorové vozy, které zajišťují cirkulaci vzduchu v sušárně a pravidelné impulzní ofukování výrobků uložených na sušárenských

vozech. Pohyb vzduchu v podélném směru v sušárně zajišťují výdechové ventilátory, umístěné nad stropem vjezdové části sušárny.

Autotest

1. Jaké druhy sušáren znáte.
2. Popište kanálovou sušárnu s rotomixery
3. Popište komorovou reverzační sušárnu.
4. Jaké sušárny používáme pro sušení surovin?
5. Jaké jsou výhody a nevýhody rozprachového sušení?
6. Jaké jsou dva základní typy kanálových (tunelových) sušáren?



4 Závěr

4.1 Shrnutí

Modul 06 studijního předmětu „Technická termodynamika“ navazuje na Modul 05 a měl za úkol čtenáře seznámit s teorií sušení i s různými typy sušících procesů a různými typy sušáren.



Kapitola 2 se věnovala procesu sušení z hlediska technologického. Různé typy sušení jsou v textu znázorněny na schématech Molliérova i - x diagramu, což dává čtenáři možnost pochopit daný proces jak z hlediska přenosu tepla, tak také z hlediska přenosu hmoty (vlhkosti).

V kapitole 3 je uvedena celá řada sušáren, které se používají v průmyslu výroby stavebních hmot a které, ač se může zdát že jsou již zcela zastaralé a nemoderní, jsou v závodech na výrobu stavebních hmot stále využívány. V této části studijních opor je uveden detailní popis sušícího zařízení a ve většině případů také jeho schéma. Je popisován pohyb vzduchu i kouřových plynů v sušárně, jsou uvedeny výhody, ale také nevýhody různých typů sušáren.

Při práci na tomto studijním textu bylo využito vědecko-výzkumného záměru MSM 0021630511 „*Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí*“.

4.2 Studijní prameny

4.2.1 Seznam použité literatury

- [1] Hejzlar, R. *Termodynamika*. ČVUT v Praze 2004, ISBN 80-01-02975-1
- [2] Nožička, J. *Termomechanika*. ČVUT v Praze 1998, ISBN 80-01-01836-9
- [3] Raček, J. *Mechanika a termomechanika, Přehled teorie a úlohy*. VUT v Brně 1992, ISBN 80-214-0446-9
- [4] Bureš, J., Malota, D., Kulísek, K. *Tepelná energetika*. VUT v Brně 1990, ISBN 80-214-0167-2
- [5] Adamovský, R., Kára, J. *Aplikovaná termomechanika*. VŠZ v Praze 1994, ISBN 80-213-0177-5
- [6] Malota, D. *Tepelná zařízení I (sušárny)*. VUT v Brně 1985
- [7] Malota, D., Novák, J. *Tepelná zařízení II (pece)*. VUT v Brně 1987
- [8] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. *Fyzika, část 2 Mechanika a termodynamika*. VUT v Brně 2000, ISBN 80-214-1868-0
- [9] Kheilová, M. *Termodynamika*. VUT v Brně 1998, ISBN 80-214-0997-5
- [10] Klomfar, J., Šifner, O. *Molliérovův h - s diagram vody a vodní páry*. Akademia Praha 1997, ISBN 80-200-0653-2



4.2.2 Odkazy na další studijní zdroje a prameny



- [11] www.label.com.pl
- [12] www.anemo.cz
- [13] www.novi.cz
- [14] www.tzb-info.cz
- [15] www.al-mo.cz
- [16] www.engext.ksu.edu
- [17] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kategorie:Termodynamika>

4.3 Klíč



Kontrolní otázky najdete vždy na konci každé z kapitol. Nejde o vyčerpávající seznam otázek k danému tématu. Tyto kontrolní otázky slouží jen jako ukázka možné formulace otázek, se kterou se může setkat v ústní části zkoušky. Odpověď na každou otázku každý pozorný čtenář snadno najde v odpovídající části textu.