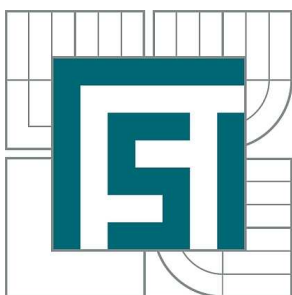


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

## HMOTNOSTNÍ A ENERGETICKÁ BILANCE PRÁDELNY BUDOUCNOSTI

HEAT AND MASS BALANCE OF UP-TO-DATE LAUNDRY PREMISE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ALENA GALČÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR BOBÁK

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Alena Galčáková

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

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

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

### **Hmotnostní a energetická bilance prádelny budoucnosti**

v anglickém jazyce:

### **Heat and mass balance of up-to-date laundry premise**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Seznámit se s procesem profesní údržby prádla. Zadání navazuje na již publikované práce. Úkolem je pro vybrané stěžejní aparáty procesu profesní údržby prádla (bubnová sušička, kalandr) sestavit jednoduchý bilanční model a tento ověřit na základě experimentálních dat z reálných provozů. Modely hlavních uzlů budou následně integrovány do výpočtového systému, na jehož vývoji se bude diplomant rovněž podílet.

Cíle diplomové práce:

Sestavit model vybraných uzlů procesu. Model implementovat do vhodného prostředí (Maple) tak, aby jej bylo možné použít k praktickým výpočtům.

Model ověřit na základě dat z reálných provozů

Použitelnost modelu demonstrovat při řešení případové studie. Získané výsledky budou graficky prezentovány.

Seznam odborné literatury:

Felder, R. M., Rousseau R. W.: Elementary Principles of Chemical Processes, Third Edition, John Wiley & Sons, (2005)

STEHLIK, P.: Laundry lessons [online], [cit. 15. 5. 2009], dostupné z <<http://www.pgprofsupport.cz/>>

PAVLAS, M.; KŠENZULIAK, V.: Optimalizace využití tepla a vody na profesní prádelně, II. etapa. Technická zpráva. Brno: Ústav procesního a ekologického inženýrství FSI VUT v Brně, 2006

KŠENZULIAK, V.: Systém pro výpočet stěžejních parametrů u energeticky náročného spotřebitele. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Pavlas.

TŮMA, Z. Model moderní komerční prádelny. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 63s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Bobák

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 14.10.2009

L.S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **Anotace**

Táto práce řeší problém určování energetické náročnosti profesní údržby prádla. Představuje výpočtové modely bubnové sušičky s parním ohřevem a kalandru, za pomoci kterých se snaží popsat faktory ovlivňující energetickou náročnost procesu sušení. Ověření modelu proběhlo pomocí experimentálních dat získaných při měření v reálném provozu velkokapacitní prádelny.

## **Annotation**

This diploma thesis is solving a problem of energy intensity evaluation of professional laundry process. It presents computational model of tumble dryer and calender. There are described factors in calender model, which influence energy intensity of drying process. Verification of the model has been done according to measured data from real professional laundry premise.

## **Klíčová slova**

profesionální prádelna, energie, bilance, sušička, kalandr, recirkulace, rekuperace

## **Keywords**

professional laundry, energy, balance, dryer, calender, recirculation, recovery

## **Bibliografická citace této práce**

GALČÁKOVÁ, A. Hmotnostní a energetická bilance prádelny budoucnosti. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Bobák.

## **Prohlášení o původnosti práce**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně s využitím uvedených zdrojů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 20. května 2010

.....

Bc. Alena Galčáková

## **Poděkování**

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu této diplomové práce Ing. Petru Bobákovi, za pomoc, cenné připomínky a osobní přístup při vedení této práce.

# Obsah

<b>1. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....</b>	<b>11</b>
<b>2. ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>3. PROCES ÚDRŽBY PRÁDLA V PROFESIONÁLNÍ PRÁDELNĚ.....</b>	<b>14</b>
3.1 ÚDRŽBA PRÁDLA V DOMÁCNOSTI.....	14
3.2 PROCES ÚDRŽBY PRÁDLA V PROFESIONÁLNÍ PRÁDELNĚ .....	14
3.3 PRACOVNÍ POSTUP PROFESIONÁLNÍ PRÁDELNY .....	16
3.4 KONTINUÁLNÍ BUBNOVÁ PRAČKA.....	17
3.4.1 Princip praní u CBW.....	18
3.4.2 Spotřeba energie .....	18
3.5 BUBNOVÁ SUŠIČKA .....	18
3.5.1 Proces sušení v bubnové sušičce.....	19
3.5.2 Definice základních termínů sušicího procesu .....	20
3.5.3 Spotřeba energie .....	21
3.6 KALANDR.....	22
3.6.1 Proces sušení a žehlení na kalandru.....	23
3.6.2 Definice základních termínů kalandrování.....	23
3.6.3 Spotřeba energie .....	25
3.7 OSTATNÍ ZAŘÍZENÍ PRÁDELNY.....	25
3.7.1 Vsádkové pračky.....	25
3.7.2 Malé sušičky .....	25
3.7.3 Tunel finisher.....	25
<b>4. HMOTNOSTNÍ A ENERGETICKÁ BILANCE PRÁDELNY .....</b>	<b>27</b>
<b>5. MATEMATICKÝ MODEL SUŠIČKY .....</b>	<b>29</b>
5.1 SUŠIČKA JAKO „BLACK BOX“ .....	29
5.2 POPIS MATEMATICKÉHO MODELU.....	31
5.3 POPIS VÝPOČTU .....	33
5.4 OVĚŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU.....	38
<b>6. MATEMATICKÝ MODEL KALANDRU .....</b>	<b>39</b>
6.1 KALANDR JAKO „BLACK BOX“ .....	39
6.2 POPIS MATEMATICKÉHO MODELU.....	40
6.3 POPIS VÝPOČTU .....	41
6.3.1 0% využití plochy kalandru .....	41



6.3.2 100% využití plochy kalandru .....	43
6.3.3 Reálné využití plochy kalandru .....	44
6.4 OVĚŘENÍ MATEMATICKÉHO MODELU .....	46
<b>7. POPIS DÍLČÍCH VÝPOČTŮ .....</b>	<b>48</b>
7.1 VÝPOČET TEPELNÝCH ZTRÁT .....	48
7.2 VÝPOČET TEPLA PRO OHŘEV ZBYTKOVÉ VLHKOSTI .....	49
7.3 VÝPOČET TEPLA PRO OHŘEV ZBYTKOVÉ VLHKOSTI PŘI REÁLNÉM VYUŽITÍ PLOCHY KALANDRU .....	49
<b>8. ROZŠÍŘENÍ VÝPOČTOVÉHO SYSTÉMU W2E .....</b>	<b>50</b>
8.1 W2E „WASTE-TO-ENERGY“ .....	50
8.2 ANALÝZA A NÁVRH KNIHOVNY „PRÁDLO“ .....	50
8.2.1 Analýza knihovny .....	51
8.2.2 Návrh knihovny .....	51
<b>9. E!SANKEY 2.X PRO .....</b>	<b>54</b>
<b>10. ZÁVĚR .....</b>	<b>56</b>
<b>11. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>57</b>
<b>12. SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>59</b>

# 1. Seznam použitých symbolů

<i>symbol</i>	<i>význam</i>	<i>jednotka</i>
$A, B, C$	konstanty Antoineova vztahu pro $H_2O$	-
$a_j, b_j, c_j, d_j, e_j$	koeficienty mocninných rozvoju	-
$B$	šířka válce	mm
$c_{H_2O, i}$	koncentrace vodní páry ve vlhkém vzduchu	% obj
$c_{odp}$	průměrná odpařovací kapacita	J/kg.K
$c_{pr}$	měrná tepelná kapacita prádla	J/kg.K
$c_{pstřed}$	střední tepelná kapacita	J/kg.K
$D$	průměr válce	mm
$gr$	gramáž	$g/m^2$
$h$	měrná entalpie páry	kJ/kg
$h_i$	měrná entalpie proudu	kJ/kg
$L$	měrná délka ideální plachty za hodinu	m/hod
$l_{23}$	výparné teplo vody	kJ/kg
$m_{H_2O}$	množství vody, které je potřeba odpařit	kg/hod
$\dot{m}_{H_2O}$	měrné množství vody v plachtě	kg/hod
$\dot{m}_i$	hmotnostní průtok vlhkého vzduchu proudu	kg/hod
$\dot{m}_{pl}$	měrná hmotnost ideální plachty	kg/hod
$n$	počet válců kalandru	-
$p$	tlak páry	bar
$p^\circ$	tlak nasycených par	kPa
$p_{atm}$	atmosférický tlak	kPa
$\dot{Q}$	výkon koryt kalandru	kJ/hod, kW
$\dot{Q}_{EVAP}$	teplo potřebné na odpaření vody z prádla u sušičky	kJ/min
$\dot{Q}_k$	tepelná ztráta při ohřevu prázdných koryt kalandru	kJ/hod
$\dot{Q}_{n, pl.}$	teplo nevyužité plochy kalandru	kJ/hod
$\dot{Q}_{odp}$	teplo potřebné na odpaření vlhkosti z prádla na kalandru	kJ/hod
$\dot{Q}_{odp\_oh}$	teplo pro ohřev prádla a odpaření vody u kalandru	kJ/hod
$\dot{Q}_{oh}$	teplo potřebné na pro ohřev zbytkové vlhkosti v prádle u kalandru	kJ/hod
$\dot{Q}_{ZTR}$	tepelné ztráty	kJ/hod, W
$q_{kond}$	kondenzační teplo páry	kJ/kg
$q_{ohl}$	měrné teplo dodané proudem 8 proudu 5 u sušičky	J/kg
$q_{oh8}$	měrné teplo přijaté proudem 5 u sušičky	J/kg
$r$	množství recirkulovaného vzduchu	%
$S$	měrná plocha ideální plachty za hodinu	$m^2/hod$

$S_{kor}$	celková plocha koryta kalandru	$m^2$
$S_{pl}$	plocha plachty při 100% využití plochy kalandru	$m^2$
$t$	teplota páry	$^{\circ}C$
$t_{EVAP}$	čas potřebný na odpaření na požadovanou vlhkost u sušičky	min
$t_i$	teplota proudu	$^{\circ}C$
$tl$	tloušťka stěny	m
$t_{ref}$	referenční teplota	$^{\circ}C$
$v$	rychlost posuvu prádla na kalandru	m/min
$V_i$	objemový průtok proudu	$m_N^3/hod$
$V_g$	měrný objem páry	$m^3/kg$
$V_m$	univerzální plynová konstanta	$m_N^3/kmol$
$x, y, z$	rozměry sušičky, kalandru	m
$x_{in}$	vstupní vlhkost	%
$x_{out}$	výstupní vlhkost	%
$x_{sv}$	hmotnostní podíl suchého vzduchu ve vlhkém vzduchu	-
$x_{vp}$	hmotnostní podíl vodní páry ve vlhkém vzduchu	-
$\alpha^{\circ}$	uhel opásání válce korytem	$^{\circ}$
$\pi$	Ludolfovo číslo	-
$\rho$	hustota vzduchu	$m^3/kg$
$\rho_{H_2O}$	měrná hmotnost vody	$kg/m^3$
$\tau$	čas potřebný na odpaření vlhkosti z prádla u kalandru	min
$\phi_i$	relativní vlhkost	%

---

**dolní index**
**význam**


---

$i$	vztahující se k číslu proudu
$j$	vztahující se k složkám vlhkého vzduchu
$pr$	vztahující se k prádlu
$sv$	vztahující se k suchému vzduchu
$vp$	vztahující se k vodní páře

## 2. Úvod

V dnešní době, kdy pomalu ale jistě ubývá zásob nerostných surovin a kdy si lidstvo začalo uvědomovat ekologický dopad svých aktivit, se při vývoji nových technologií poměrně velkou mírou věnuje zvýšení efektivity procesů a tím i snížení ekologické a energetické zátěže. Zvyšování efektivity v provozech je zaváděno také z důvodu snížení nákladů a zvýšení zisků těchto provozů. Jedním z odvětví, kde je nutno zabývat se ekologickými a energetickými dopady je proces údržby prádla z důvodu používání značného množství chemických látek a vysoké spotřeby vody a energií. Současná technologie pracích a sušících strojů v domácnostech je na vysoké úrovni a lze konstatovat, že efektivita těchto strojů je na vysoké úrovni. Na druhé straně stojí profesionální prádelny, které mají mnohdy zastaralejší zařízení, které je energeticky náročné. Při zpracovatelském výkonu kolem 10 tun prádla za den, tyto prádelny plýtvají značným množstvím energií. Jako jedna z možností úspory energií se jeví výměna staršího zařízení za nové úspornější a tím i ekologičtější. Tato možnost je však ekonomicky velice zatěžující a ne všechny prádelny by si ji mohli dovolit. Další možnosti úspory energie je optimální využití veškerého odpadního tepla u jednotlivých strojů, je ovšem nutné brát provoz jako celek. Optimalizace pouze jednoho ze strojů by totiž v konečném důsledku nemusela spotřebu energie snížit, ale naopak by ji mohla znatelně zvýšit.

Od roku 2006 se problémem optimalizace využití energií v profesionální prádelně zabývá i Ústav procesního a ekologického inženýrství (dále ÚPEI) na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně, a to na základě žádosti společnosti Procter & Gamble o pomoc při řešení tohoto problému. Následně na to vznikla na ÚPEI myšlenka realizovat vlastní model výzkumné prádelny budoucnosti, jakožto představitel energeticky náročného procesu a to v rámci výzkumného projektu NETME Centr. Vzniklo několik prací, které se touto problematikou zabývají [1], [2], [3], [4], [5], [6], a na které tato práce navazuje.

Cílem této diplomové práce je energetická bilance procesu profesní údržby prádla a návrh matematických modelů bubnové sušičky s parním ohřevem a kalandru. Matematické modely jsou určeny pro optimalizaci využití energií v reálném provozu prádelny. V úvodu je popsána problematika profesní údržby prádla. V dalších částech práce jsou popsány matematické modely sušičky a kalandru, jež byly vytvořeny v prostředí programu MS Excel. V závěru práce se nachází také popis konceptu knihovny „pradlo“, který by měl stejně jako navržené výpočtové modely, posloužit jako podklad pro programátory, kteří se podílí na vývoji aplikace Waste-to-Energy.

Při pohledu do blízké budoucnosti se na strojních zařízeních profesních prádelen nic zásadního měnit nebude. Vývoj nových technologií je sice rychlý, ale ne každá prádelna, která je již v provozu bude schopna obnovovat strojní zařízení při uvedení každé novinky na trh. Ovšem budoucnost praní je v tom, že se ve všech technologických procesech bude využívat veškeré odpadní teplo a tudíž se budou snižovat energetické nároky na celkový provoz profesních prádelen.

## 3. Proces údržby prádla v profesionální prádelně

### 3.1 Údržba prádla v domácnosti

Mnoho lidí si umí představit, co přibližně zahrnuje slovní spojení „proces praní a údržba prádla“. V případě praní v domácnosti to je roztřídění prádla dle barev, typu materiálu a míry znečištění. Problémem je většinou neodborný přístup k již zmíněnému třídění, dávkování pracích prostředků a také poměrně vysoká spotřeba vody. Důvodem je určitá míra benevolence k výsledné kvalitě praného prádla. Vzhledem k tomu, že dnešní automatické pračky dokážou zpracovat pouze 3 až 8 kg prádla za jeden cyklus, se může prací proces při nevyhovujícím výsledku snadno opakovat. Další součástí údržby prádla v domácnostech je jeho sušení, které následuje bezprostředně po praní. Trendem dnešní doby je pořizovat si sušičky prádla. Jejich nároky na prostor společně s pračkou (obr. 3.1) jsou minimální. Bohužel, co se týče spotřeby energie, jsou sušičky energetické třídy A nebo A+ velice náročné na pořizovací cenu. Výhodou je však ušetřený čas, který by se jinak musel strávit jak věšením prádla, tak jeho žehlením. Většina sušiček je totiž vybavená programem „Snadné žehlení“ a tlačítkem ochrany proti pomačkání prádla. Existuje také možnost sušení prádla klasickým způsobem, a to pověšením mokrého prádla na sušák. Spotřeba elektrické energie pak klesá k nule. V tomto případě ale záleží na podmínkách v jakých se prádlo suší. Jeho vysušení může trvat i několik dní. Čím je teplejší a sušší prostředí, tím je potřeba méně času na sušení a naopak. Poté většinou následuje žehlení, o jehož fyzické a časové náročnosti ani nemluvě.



Obr.3.1 – Příklad praní v domácnostech [7]

### 3.2 Proces údržby prádla v profesionální prádelně

Na rozdíl od domácí údržby prádla je praní a celkový proces údržby prádla v profesionální prádelně (obr. 3.2) poněkud komplikovanější a nezahrnuje pouze samotné praní prádla, ale také veškeré operace související s prádlem. Stejně jako u praní v domácnosti je to třídění, sušení, žehlení, skládání a stohování, ovšem ve velkém množství. Významnou roli hraje i spolehlivá doprava prádla, která rychle a včas vyzvedne špinavé prádlo u zákazníka a vyprané mu ho doveze zpět.

V profesní prádelně jsou kladeny vysoké nároky na kvalitu odstranění znečištění, bělost a vůni, které musí uspokojit požadavky všech zákazníků. Nepřipouští se zde opakování pracího procesu z důvodu vysokých ekonomických ztrát. V případě nesprávného nastavení totiž standardní prací linka produkuje přibližně 50 kg špinavého prádla každé tři minuty. Vysoký důraz je kladen na celkové náklady, ale také na splnění limitů daných legislativou, které se týkají například vlivu odpadních vod na životní prostředí. Produktem prádelny je čisté prádlo, které musí být schopno svou kvalitou a cenou čelit konkurenci.



Obr.3.2 – Příklad údržby prádla v profesionální prádelně [8]

Zákazníky velkokapacitních prádelen jsou zejména hotely, nemocnice, gastronomické provozy a výrobní podniky. Sortiment prádla udává tab. 3.1.

Provoz	Typ prádla	Typ znečištění / údržby
hotely	froté prádlo	prachem, tukem a cukry (bývá relativně čisté téměř každodenně prané)
	bíle ložní prádlo	
	stálo barevné ložní prádlo	
nemocnice	bíle ložní prádlo	
	stálobarevné ložní prádlo	
	prádlo pro nemocné	krví a lidskými exkrementy
	prádlo pro personál	
	pracovní oblečení	modré prádlo pro pracovníky údržby
	operační prádlo	velké množství krve, částmi lidského těla a operačními nástroji - složité pro čištění
	dermatologické prádlo	tuky, lidskými exkrementy, krémy a chemickými preparáty
infekční prádlo	prádlo vyžadující speciální péči	
gastronomické provozy	prádlo pro personál	velké množství přírodních tuků, živočišné krve a různé druhy potravinářských barev

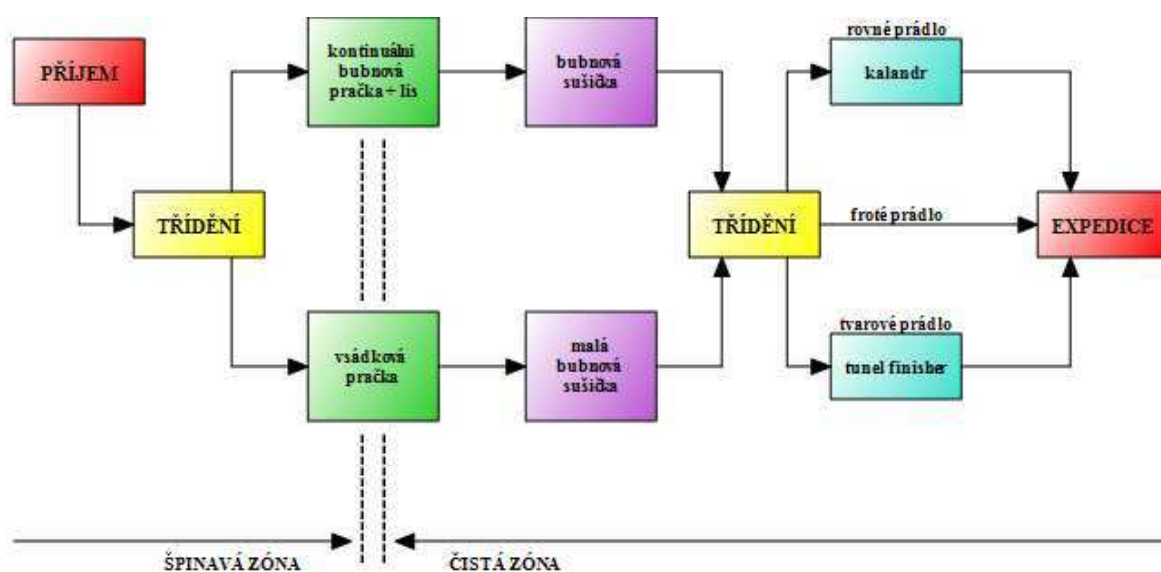
Tab. 3.1 – typy prádla dle zákazníků

### 3.3 Pracovní postup profesionální prádelny

Hlavní operace využitě v procesu údržby prádla jsou:

- praní prádla v tunelové nebo ve vsádkové pračce,
- odvodňování mokrého prádla lisem nebo pomocí odstředivky,
- sušení prádla v systémové bubnové sušičce nebo v kompaktní sušičce,
- žehlení rovného prádla na kalandru
- a dokončování tvarového prádla v tzv. tunel finisheru.

Skladba aparátů konkrétní prádelny se liší v závislosti na množství, druhu a míře znečištění zpracovávaného prádla.



Obr.3.3 – zjednodušené schéma toku prádla po prádelně

Na obr. 3.3 je znázorněno zjednodušené schéma toku prádla po prádelně. Poté, co je prádlo dopraveno nákladními automobily od zákazníků, jež mohou být od vlastní prádelny vzdáleni až 200 km, vstupuje prádlo do provozu do tzv. špinavé zóny. Zde je dočasně uskladněno a následně tříděno. Znečištěné prádlo bývá umístěno v přepravních vozících, nebo bývá uloženo v transportních vacích.

Podle hmotnosti zakázky a míry znečištění je prádlo roztříděno na menší objemy, tzv. dávky. Silně znečištěné prádlo menšího množství bývá většinou zpracováváno vsádkovými pračkami, zatímco velké množství s menší úrovní znečištění je práno v tunelové pračce, do které je dopravováno za pomoci dopravníku. Zajištění správného dávkování je důležité z hlediska efektivní spotřeby prací chemie, vody a tepla. Vyprané a tedy čisté prádlo se následně zpracovává v čisté zóně. Vstup ze špinavé do čisté zóny je možný pouze přes dezinfekční komoru, která je zabudovaná v dělicí přičce. Po vyprání v kontinuální pračce je prádlo odvodněno za pomoci lisu a následně je automaticky manipulátorem dopravováno do bubnových sušiček. Čisté prádlo ze vsádkových praček je obsluhou manuálně překládáno do kompaktních

sušiček. Po sušení je prádlo opět tříděno. Na froté, které se suší do sucha a po složení putuje rovnou na expedici, na rovné prádlo, které putuje na kalandr, kde se vysuší do sucha a zároveň i vyžehlí, a na tvarové prádlo, jež se dosušuje například v tunel finisheru.

### 3.4 Kontinuální bubnová pračka

Kontinuální (průběžná) prací linka, neboli tunelová pračka (CBW, angl. Continuous Batch Washer), je velice specifické vysokokapacitní zařízení vyrobené na míru zákazníka, a je nedílnou součástí každé profesionální prádelny (viz obr. 3.4). Může mít různé velikosti bubnu, počty komor, rozdílné potrubní systémy, a také může být vybavena různými recyklačními systémy. Pračka může mít v zóně hlavního praní dopředný proud nebo protiproud, popř. jejich kombinaci. Jsou navrženy pro používání v optimálních technologických podmínkách, mohou tedy být používány jen pro praní s měkkou vodou. Tvrdá voda totiž výrazně snižuje jejich životnost.



Obr. 3.4 – kontinuální bubnová pračka [9]

Výhody použití tunelových praček jsou:

- plně automatizovaný prací proces,
- nízká spotřeba vody (od 5 litrů na 1 kg suchého prádla)
- a vysoká produktivita (350 až 6 000 kg prádla za hodinu).

Nevýhody tunelových praček jsou:

- vysoké pořizovací náklady,
- nutná dobrá znalost technologie praní,
- použití je možné pouze pro velké pravidelné množství prádla
- a je vyžadováno použití kvalitní, měkké vody [2].



### **3.4.1 Princip praní u CBW**

Průběžná pračka je v podstatě několik vzájemně propojených bubnových praček za sebou, přičemž jednotlivé bubny (komory) jsou navzájem spojeny, a dohromady tak tvoří kompaktní celek. Princip praní je prakticky stejný jako u „domácích“ bubnových praček. Komory CBW jsou sdruženy do několika sekcí, a to předpírky, hlavního praní a máchání.

Prádlo postupuje od začátku i s vodou postupně z komory do komory. Každý buben koná kývavý pohyb zleva doprava (kolem 240 °), přičemž jednou za takt (časový interval mezi dvěma úplnými otáčkami – vyjadřuje se v sekundách) vykoná celou otáčku, kdy prádlo přepadne z jedné komory do druhé. Jednotlivé sekce kontinuální bubnové pračky byly podrobně popsány v [1].

Pomocí mechanického odvodnění prádla, je jeho vlhkost snížena na 45 až 55 % hmotnosti suchého prádla. V profesionálních prádelnách se k tomuto účelu využívají buď odstředivky (odstředivé centrifugy) nebo lisy (tlaky 18 až 57 bar), jejichž produktem bývá kompaktní těleso složené ze slisovaného prádla ve formě tzv. „koláče“.

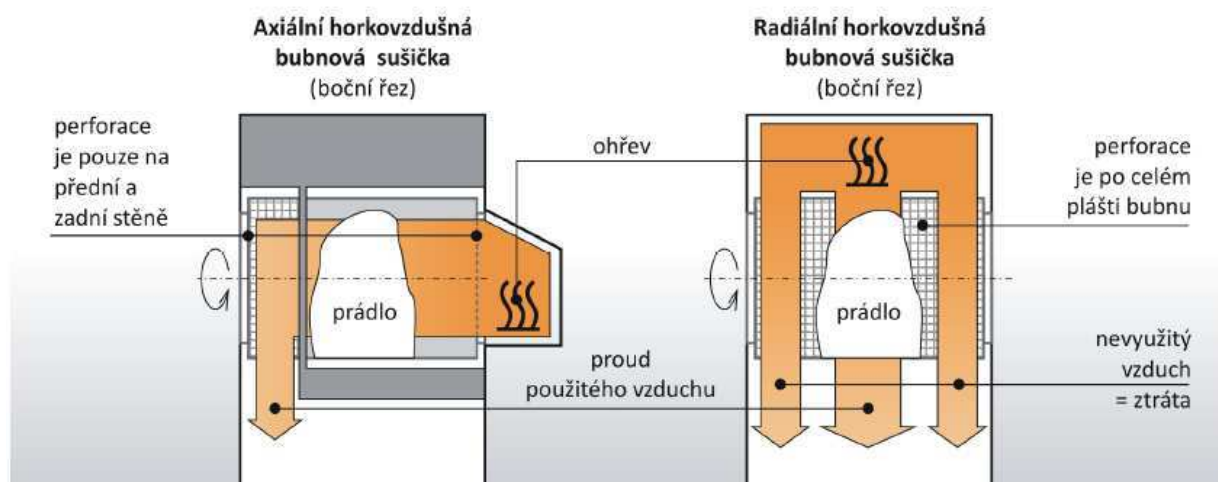
### **3.4.2 Spotřeba energie**

Spotřeba energie u tunelové pračky je určena množstvím potřebného tepla ve formě páry, které je potřeba pro ohřev prací lázně. Pro ohřev 1 kg vody o jeden stupeň Celsia je zapotřebí 4,2 kJ energie [3]. Daleko nižší spotřeby vody se dá dosáhnout i správně nastavenou recirkulací použité vody například z lisu nebo z finálního máchání. K významným úsporám energie a vody může také přispět zapojení regulovaného tepelného výměníku, ve kterém se ohřívá studená čerstvá voda pomocí vody odpadní.

## **3.5 Bubnová sušička**

Jedním z hlavních aparátů, kterým se tato práce z energetického hlediska věnuje, je bubnová sušička. Hlavním úkolem tohoto zařízení je odstranění zbývající vlhkosti z prádla po odvodnění v lisu za prací linkou, dále pak příprava prádla pro další operaci – žehlení. Sušením bývá z prádla odstraněno 0,05 až 0,55 kg vlhkosti na 1 kg suchého prádla v závislosti na parametrech sušicího procesu.

Z konstrukčního hlediska rozlišujeme sušičky axiální, kde sušicí médium proudí ve směru osy rotace bubnu, a sušičky radiální s médiem proudícím kolmo k ose bubnu (obr. 3.5). U radiálních sušiček se však nevyužívají okrajové části, kterými sušicí médium proudí, a to má za následek větší energetické ztráty než u sušiček axiálních.



Obr.3.5 – typy sušiček z konstrukčního hlediska [4]

### 3.5.1 Proces sušení v bubnové sušičce

Bubnová sušička slouží k:

- rozvolnění koláče,
- předsušení
- a celkovému vysušení prádla.

Za pomoci zdvihového dopravního pásu je částečně odvodněné prádlo z lisu pračky ve formě tzv. koláče vloženo do bubnu sušičky. Plnění je tedy prováděno automaticky, přes pneumaticky ovládaná dvířka na přední straně stroje. Prádlo je nejprve rozvolněno. K samotnému rozvolnění prádla je možné využít další zařízení (velice podobné sušičce, ale bez ohřevu), které by bylo umístěno mezi kontinuální pračkou a sušičkou. Poté dochází k ohřevu prádla a odpařování vlhkosti v něm vázané. Sušicím médiem je vzduch, který je nasáván z prostoru prádelny do parního výměníku, kde je ohříván na požadovanou teplotu, jež se pohybuje v rozmezí 150 – 180 °C v závislosti na typu prádla. Při procesu odpařování vlhkosti se sušicí médium ochlazuje a spolu s odpařenou vlhkostí odchází do odtahu. Vlastnosti použité páry pak odpovídají cílové teplotě, obvykle se využívá 13 barová pára, výjimečně může mít až 16 barů.

Prádlo které odchází ze sušičky má tyto vlastnosti:

- v případě rovného prádla, které bude následně zpracovááno na kalandrech, je jeho relativní vlhkost 18 až 45 % a teplota se pohybuje v rozmezí 45 až 50 °C,
- v případě tvarového prádla se relativní vlhkost pohybuje kolem 5 % s teplotou 60 až 70 °C
- v případě froté prádla je výstupní relativní vlhkost téměř 0 % s teplotou kolem 50 až 60 °C [2].

### 3.5.2 Definice základních termínů sušicího procesu

#### Průměrná odpařovací kapacita

Množství vody, které je schopné sušička z prádla odpařit za určitý čas, definuje odpařovací kapacita. Je závislá zejména na velikosti bubny sušičky – ploše, na které dochází k přenosu hmoty, na vlastnostech sušicího média a na vlastnostech sušené textilie.

Experimentální určení odpařovací kapacity je poměrně jednoduché. Je potřebné znát dobu sušení a množství odpařené vody během sušicího cyklu. To se určí z rozdílu hmotnosti prádla před a za sušičkou. Odpařovací kapacita se pak jednoduše vypočte dle rovnice číslo 1a.

$$\frac{\text{hm. prádla před sušením [kg]} - \text{hm. prádla po sušení [kg]}}{\text{doba sušení [s]}} = \frac{\text{odpařovací kapacita}}{\text{[kg H}_2\text{O/s]}} \quad (1a)$$

U každé sušičky bývá odpařovací kapacita zadaná výrobcem nejčastěji v litrech za minutu [l/min]. Pak platí převodní vztah 1b, kde  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  je měrná hmotnost vody.

$$\frac{1000[\text{l/m}^3]}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}[\text{kg/m}^3]} \cdot \frac{\text{odpařovací kapacita}}{\text{[kg H}_2\text{O/s]}} = \frac{\text{odpařovací kapacita}}{\text{[l H}_2\text{O/min]}} \quad (1b)$$

#### Takt sušičky

Takt sušičky se skládá:

- ze samotné doby sušení – závisí na dané vstupní a na požadované výstupní vlhkosti prádla, dávkovaném množství prádla a na odpařovací kapacitě sušičky
- a z doby přípravy jedné dávky – závisí na rychlosti výměny usušeného prádla za nový „koláč“ z lisu.

Aby nemusela pračka čekat do doby, než bude sušička opět připravená, neměl by takt sušičky být delší než takt pračky. Optimální možností je pak zvolit takt sušičky jako násobek taktu pračky, úměrně tomu se však musí zvýšit i počet sušiček. Pak budou sušičky plněny postupně na konci každého taktu pračky.

Celkový čas sušení určíme jednoduše z následující rovnice, známe-li takt sušičky:

$$\frac{\text{množství prádla [kg]}}{\text{dávkované množství [kg]}} \cdot (\text{doba sušení [s]} + \text{doba přípravy [s]}) = \text{celkový čas sušení [s]}$$

$$\text{potřebný počet taktů [1]} \cdot \text{doba taktu [s]} = \text{celkový čas sušení [s]} \quad (2)$$

### Vlhkost prádla

Vlhkost prádla je definovaná jako množství vody v kilogramech obsažené v 1 kg suchého prádla. Ze základní rozvahy nad množstvím vody v bubnu sušičky je možné dojít ke vztahu:

$$\begin{array}{ccc} \text{množství vody v bubnu} & \text{množství odpařené vody} & \text{množství vody v bubnu} \\ \text{na začátku sušení} & \text{za dobu sušení} & \text{po sušení} \\ \text{[kg H}_2\text{O]} & \text{[kg H}_2\text{O]} & \text{[kg H}_2\text{O]} \end{array} =$$

$$\begin{array}{ccccccc} \text{dávkové} & \text{vstupní} & \text{odpařovací} & \text{doba} & \text{dávkové} & \text{výstupní} \\ \text{množství} \cdot & \text{vlhkost} & \text{kapacita} \cdot & \text{sušení} & \text{množství} \cdot & \text{vlhkost} \\ \text{[kg]} & \text{[kg H}_2\text{O/kg]} & \text{[kg H}_2\text{O/s]} & \text{[s]} & \text{[kg]} & \text{[kg H}_2\text{O/s]} \end{array} =$$

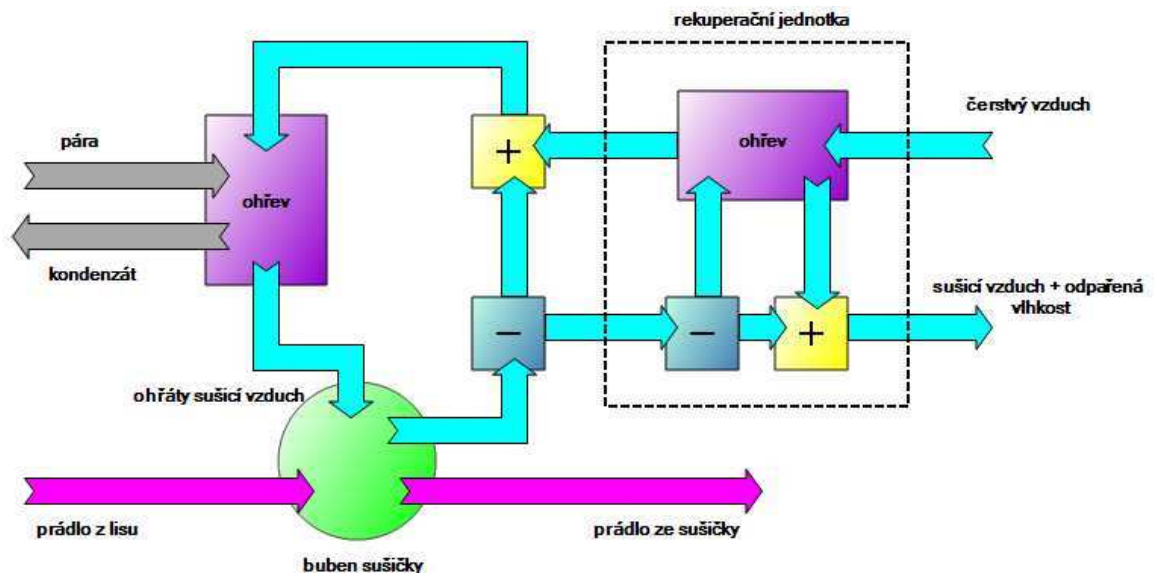
(3)

Z rovnice 3 je pak možné vyjádřit kterýkoliv její člen. Například je možné zjistit potřebnou dobu sušení při dané vstupní a požadované výstupní vlhkosti, přičemž odpařovací kapacita a dávkové množství jsou parametry sušičky.

### **3.5.3 Spotřeba energie**

Vzhledem k tomu, že hlavním cílem sušičky je odpařování, je energie přiváděná v podobě páry využita účelně. Množství této energie však nemůže být žádným způsobem zredukováno. Velikost potřebné energie je přibližně 2500 kJ na 1 litr odpařené vody. Část přiváděné energie se využívá na ohřev prádla (je řádově nižší, cca 78 kJ na 1kg prádla pro ohřev o 60 °C [10]) a na krytí tepelných ztrát do okolí.

Jednou z možností, jak snížit spotřebu tepla, je zapojení rekuperační jednotky při křížení použitého sušicího – teplého vzduchu a proudu čerstvého – studeného vzduchu, a předehrávat tak sušicí médium vstupující do systému. Další možností je znovu použít odcházející sušicí vzduch – způsobem recirkulace. Nejlepší je ovšem kombinace obou zároveň, jak je možné vidět na obr. 3.6.



Obr.3.6 – základní funkční schéma bubnové sušičky s rekuperační a recirkulační jednotkou

### 3.6 Kalandr

Dalším aparátem, kterým se táto práce zabývá z energetického hlediska podrobně je kalandr. Je to v podstatě žehlič, který slouží k odstranění zbývající vlhkosti z prádla. Používá se hlavně pro prádlo pravidelných rozměrů, jako jsou například povlečení peřin a polštářů, ubrusů a další textilie pravidelných tvarů, které tvoří podstatnou část skladby prádla v profesionálních prádelnách.



Obr.3.7 – ilustrační obrázek kalandru [11]

Podle zpracovatelské kapacity je toto zařízení vybaveno 1 až 4 válci zařazenými za sebou, které jsou opatřeny textilními nábalý (obr. 3.7). Nábalý jsou na válec připevněny pomoci pružin. Kalandr bývá často opatřen automatickým nebo poloautomatickým podavačem (dávkořev) prádla a také skladačem nebo stohovačem. Jsou to zařízení, která usnadňují obsluhu kalandru, čímž výrazně zvyšují jeho produktivitu.

### **3.6.1 Proces sušení a žehlení na kalandru**

Vlhké prádlo vstupuje přes přední část kalandru. Zároveň je zde přisáván sušící vzduch z prostoru prádelny. Při kontaktu s vyhřívanou teplosměnnou plochou koryta dochází k přenosu tepla, ohřevu prádla a tím k následnému odpařování vlhkosti. Vlhkost je odsávána přes prodyšný plášť válce. Sušící vzduch je společně s odpařenou vlhkostí odtahován pryč.

### **3.6.2 Definice základních termínů kalandrování**

#### Odpařovací kapacita

U kalandrů lze stejně jako u sušiček definovat odpařovací kapacitu. Hodnota odpařovací kapacity u kalandrů se vztahuje na 1 metr čtvereční vyhřívané plochy. Její měřicí jednotka je tedy [l/hod/m<sup>2</sup>]. Hodnoty uváděné výrobcí se ale liší v závislosti na provedení teplosměnné plochy, například:

- duplikátorová koryta mají odpařovací kapacitu přibližně 30 l/hod/m<sup>2</sup>
- koryta se zvýšenou turbulencí dosahují hodnot až 40 l/hod/m<sup>2</sup>.

#### Velikost vyhřívané plochy kalandru

Stanoví se ze základních geometrických charakteristik kalandru dle následujícího vztahu:

$$n[-] \cdot \frac{\pi \cdot D [m] \cdot \alpha [^\circ] \cdot b [m]}{360} = \frac{\text{vyhřívaná plocha}}{[m^2]},$$

kde

(4)

- $n$  je počet válců,
- $D$  je průměr jednoho válce,
- $\alpha$  je úhel opásání válce korytem,
- $b$  je šířka jednoho válce.

#### Teplota koryta

Teplota koryta je dána parametry páry, a proto se na velkých korytech zpravidla nereguluje.

#### Gramáž prádla

Plošná gramáž prádla [g/m<sup>2</sup>] je důležitým parametrem prádla, protože prádlo s vyšší hodnotou gramáže (tedy těžší prádlo), obsahuje více vody, kterou je potřeba odpařit na jednotku plochy. Hodnota gramáže se jednoduše určí z geometrických charakteristik kusu prádla dle vztahu:

$$\text{gramáž} \left[ \frac{g}{m^2} \right] = \frac{\text{hmotnost} [kg] \cdot 10^3 \left[ \frac{g}{kg} \right] \cdot 10^6 \left[ \frac{mm^2}{m^2} \right]}{\text{šířka} [mm] \cdot \text{délka} [mm] \cdot \text{vrstev} [-]}$$

(5)

### Vlhkost prádla

Vlhkost prádla je definována jako množství vody v kilogramech obsažené v 1 kg suchého prádla. Stejně jako u sušiček se i u kalandru rozlišuje vlhkost prádla vstupní a výstupní.

### Rychlost posuvu

Jedním z provozních parametrů, které lze při reálném provozu nastavit dle typu žehleného prádla je rychlost posuvu prádla přes kalandr. Její regulací se docílí toho, aby bylo prádlo na výstupu z kalandru ve všech místech suché. Pro výpočet rychlosti posuvu lze sestavit rovnici:

$$\frac{\rho_{H_2O} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]}{1000 \left[ \frac{l}{m^3} \right] \cdot 60 \left[ \frac{min}{hod} \right]} \cdot \frac{\text{odpařovací kapacita} [l/hod/m^2]}{[\text{hod}/m^2]} \cdot \frac{\text{délka vyhřívané plochy} [m]}{[m]} \cdot \frac{1000 \left[ \frac{g}{kg} \right]}{\text{gramáž prádla} [g/m^2]} \cdot \frac{1}{\text{vstupní vlhkost} [kg H_2O/kg] - \text{výstupní vlhkost} [kg H_2O/kg]} = \frac{\text{rychlost posuvu} [m/min]}{[m/min]}$$

### Využití plochy kalandru

(6)

Vzhledem k tomu, že pás o šířce přibližně 150 mm po obou stranách plochy kalandru se nevyužívá (považuje se za mrtvý prostor), je potřeba zavést součinitel využití plochy kalandru. Určuje ho také způsob vkládání jednotlivých kusů prádla do kalandru. Využití plochy se výrazně snižuje špatnou organizací práce, ručním vkládáním, nebo žehlením drobných kusů prádla. Ovšem strojní vkládání jej podstatně zvyšuje.

### Doba kalandrování

Dobu, za kterou bude zpracována dávka prádla, lze určit ze znalosti posuvu :

$$\frac{1000 [g/kg] \cdot \text{množství prádla} [kg]}{\text{šířka válce} [m] \cdot \text{rychlost posuvu} [m/min] \cdot \text{gramáž prádla} [g/m^2] \cdot \text{součinitel využití plochy kalandru} [1]} = \frac{\text{doba kalandrování} [min]}{[min]}$$

(7)

### **3.6.3 Spotřeba energie**

Spotřeba energie na kalandru je dána množstvím páry a tedy teplem potřebným pro ohřev prádla, teplem pro odpaření vody z prádla, teplem pro krytí tepelných ztrát odcházejícím vlhkým vzduchem a ztrátami do okolí.

Z výše uvedených potřeb tepla je možné ovlivnit pouze složky ztrátové. Například tepelné ztráty do okolí je možné snížit zakrytím koryta kalandru, které je u moderních kalandrů běžné, nebo také změnou množství vzduchu, který je do kalandru přisáván a slouží k odvodu vzniklé vodní páry.

Vzhledem k tomu, že nejvíce vzduchu je odtahováno z prvního válce a tedy nejvíce vlhkosti odchází z prádla hned na začátku, by bylo možné využít odsávaný vzduch z ostatních válců k ohřevu prádla, což by teoreticky také snížilo spotřebu páry. Množství přisávaného vzduchu musí být však velké tak, aby vzniklá paroplynová směs byla dostatečně vzdálená od teploty rosného bodu (její teplota se pohybuje v rozmezí 100 až 120 °C). Brýdové páry mohou v odtahu částečně kondenzovat, jelikož bývají znečištěné parafínem a polyetylenovými vosky.

## **3.7 Ostatní zařízení prádelny**

### **3.7.1 Vsádkové pračky**

Vsádkové pračky jsou využívány k praní malých objemů prádla (7 až 40 kg), které se vyznačuje vysokou mírou znečištění, nebo velkým pouštěním barviva. Jsou obsluhovány manuálně pracovníky prádelny. Prádlo je podobně jako u kontinuální pračky plněno ve špinavé zóně a po vyprání je vytaženo v zóně čisté. Cyklus praní obvykle trvá 20 až 50 minut a to v závislosti na typu zařízení a množství praného prádla.

### **3.7.2 Malé sušičky**

V návaznosti na vsádkové pračky se v prádelnách nacházejí malé sušičky. Slouží bezvýhradně pro sušení prádla zpracovávaného ve vsádkových pračkách. Nejčastěji sušičky pracují s parním ohřevem, ovšem existují i s ohřevem elektrickým.

### **3.7.3 Tunel finisher**

Tunel finisher (obr. 4.1) je zařízení, které slouží k dalšímu zpracování tvarového prádla (pláště, košile, kalhoty...), k jeho dosušení a žehlení.

Prádlo prochází několika částmi:

- parní komorou, kde se oděv připraví pro další žehlení
- a další komorou, kde je prádlo vyrovnáno proudem horkého vzduchu.



Pára je do tunel finisheru přiváděná potrubím nacházejícím se na horní straně zařízení. Po ochlazení je společně s kondenzátem odváděná na opačné straně.

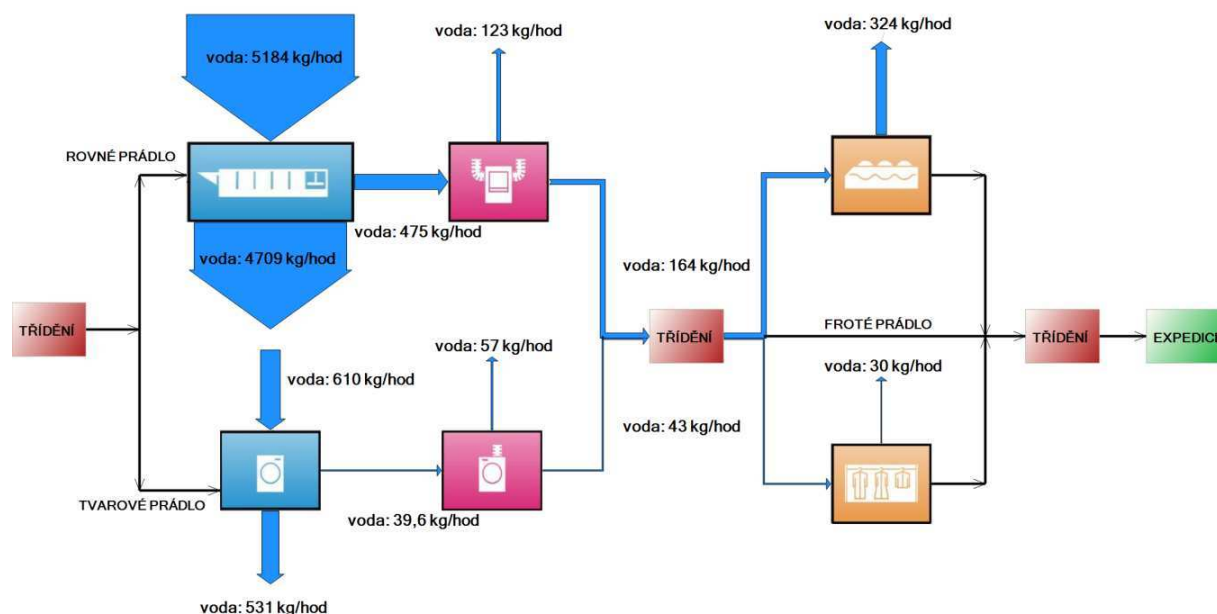


*Obr.4.1 – ilustrační obrázek tunel finisheru [12]*

## 4. Hmotnostní a energetická bilance prádelny

Konečným produktem prádelny je čisté a suché prádlo. Vzhledem k tomu, že dosavadní principy praní v profesionální prádelně jsou založeny na mokřem pracovním procesu, je potřeba vodu, absorbovanou prádlem v pračce následně odstranit. Největší část energie se spotřebovává právě za tímto účelem. Pro porovnání je možné uvést následující fakta.

K ohřevu jednoho kilogramu vody o jeden stupeň Celsia je zapotřebí přibližně 4,2 kJ energie, zatímco k odpaření jednoho kilogramu vody při atmosférickém tlaku je zapotřebí 2257 kJ energie, což je téměř 540krát více [10]. Ukázky Senkeyho diagramu hmotnostních a energetických bilancí celé prádelny jsou uvedeny v příloze [P1]. Je třeba brát v úvahu, že v prací lince se voda ohřívá o víc než jeden stupeň Celsia a také se ohřívá i větší množství vody, než se následně odpařuje v sušičkách nebo na kalandru. Z toho důvodu není nepoměr spotřeby energií tak velký. Ovšem na druhou stranu, efektivita ohřevu vody v tunelové pračce je téměř 100 %, zatímco efektivita sušení a žehlení se 100 % nikdy blížit nebude. Následující schéma zobrazuje průběh prádla prádelnou a znázorňuje tok vody a vlhkosti obsažené v prádle při průchodu jednotlivými zařízeními.

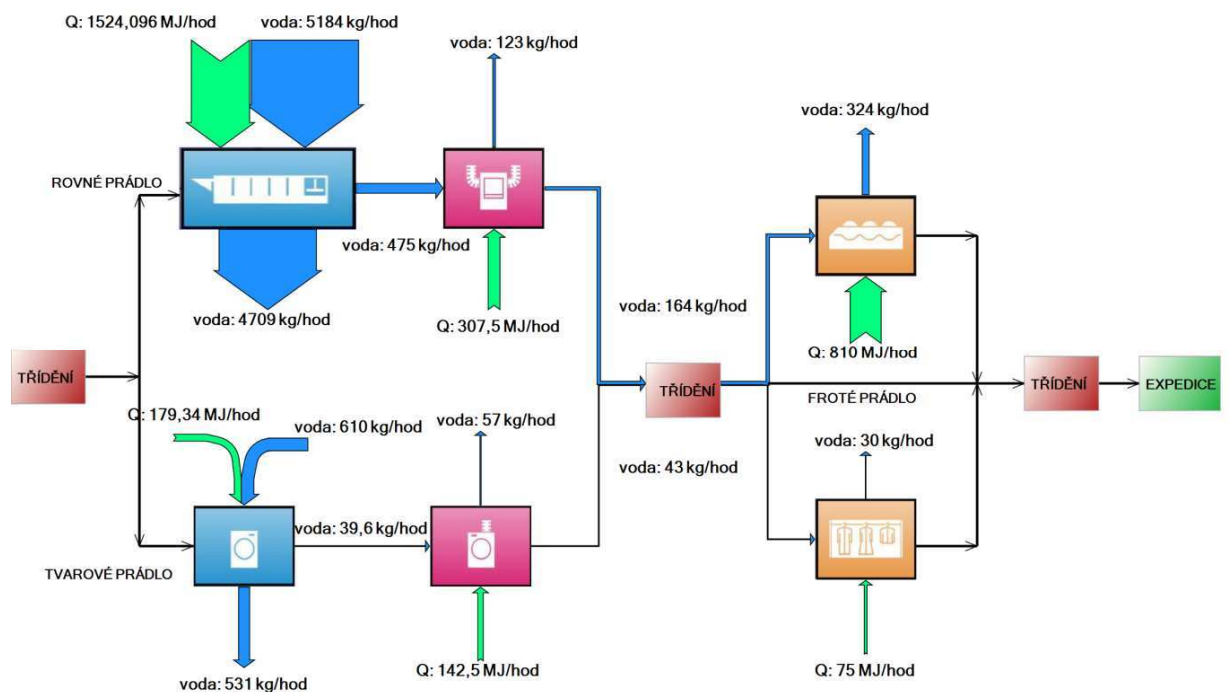


Obr.5.1 – schematické znázornění okamžitých průtoků praček, sušiček a kalandru

Z obr. 5.1 je vidět, že při velikosti jedné dávky prádla o hmotnosti 36 kg a při spotřebě 6 l vody na 1 kg suchého prádla, je největší spotřeba vody u kontinuální prací linky a to až 5184 kg/hod. Množství vody, které v prádle zůstává po odvodnění prádla v lisu je značně vysoké.

Na obrázku jsou schematicky znázorněné okamžité průtoky jednotlivých zařízení. Ovšem hodnoty skutečných průměrných průtoků budou nižší z důvodu diskontinuálního procesu u jednotlivých zařízení. Například u sušičky jsou to pauzy na nakládku a vykládku prádla a u kalandru jsou to pauzy mezi vkládáním jednotlivých kusů prádla. Množství odpařené vody v sušičce se také mění v závislosti na požadované výstupní vlhkosti a na vlastnostech přísávaného vzduchu. Sušení bude probíhat mnohem rychleji, pokud bude relativní vlhkost vzduchu nízká. Skutečný průtok odpařené vlhkosti u kalandru bude mnohem nižší z důvodu 100% nevytíženosti plochy kalandru. Hodnota okamžitého průtoku odpařené vody je totiž počítána při stoprocentním vytížení pracovní plochy kalandru.

Na spotřebu vody navazuje spotřeba tepla potřebného pro ohřev vody v kontinuální práci lince, ve vsádkové pračce a na odpaření vlhkosti z prádla v sušičkách a na kalandru. Následující schéma znázorňuje okamžitou teoretickou spotřebu tepla u jednotlivých zařízení.



Obr.5.2 – schematické znázornění teoretické spotřeby tepla v prádelně

Z obr. 5.2 je patrné, že nejvíce energie se spotřebuje k odstranění vlhkosti, která se do prádla dostane při procesu mokrého praní vzhledem k množství vody, kterou je potřeba ohřát, nebo odpařit. Spotřeba energie u pračky je několikanásobně menší než veškerá energie spotřebovaná k odpařování.

Skutečná spotřeba energie se od teoretické značně liší. V reálném provozu jsou teoretické spotřeby tepla nedosažitelné, protože ve skutečnosti jsou velké tepelné ztráty do okolí. Například v případě sušičky jsou to tepelné ztráty v odtahovaném sušicím vzduchu a radiací do okolí. U kalandru je problém ztrát tepla do okolí velice podobný. Spotřebu energie také zvyšuje špatná organizace práce (např. nízké pracovní nasazení obsluhy kalandru). Z těchto důvodů pak účinnost jednotlivých strojů není zdaleka stoprocentní.

## 5. Matematický model sušičky

Dalším bodem této práce bylo vytvoření matematického modelu [P2]. Zde je snaha o bližší popsání všech ovlivňujících faktorů, které byli popsány v předchozí části. Smyslem však není návrh komplexního výpočtového modelu celé prádelny, ale jen dvou jejích částí, a to bubnové sušičky s parním ohřevem a kalandru. Tato kapitola podrobně popisuje matematický model bubnové sušičky s parním ohřevem.

### 5.1 Sušička jako „Black Box“

Aby bylo možné provést návrh bubnové sušičky s parním ohřevem, je nutné si udělat představu o tom jak vůbec zařízení pracuje. Prvotním návrhem sušičky jako takové je tedy „black box“, černá skříňka (viz obr. 5.1), u které jsou definovány pouze vstupní a výstupní proudy.

Vstupními proudy jsou:

- pára,
- prádlo (suché),
- vlhkost vázaná v prádle
- a sušicí vzduch.

Výstupními proudy jsou:

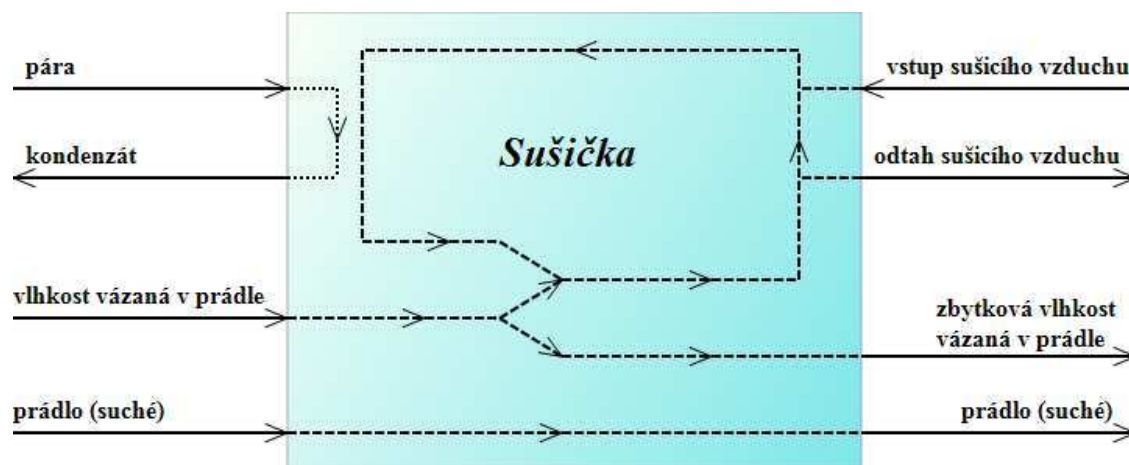
- kondenzát,
- prádlo (suché),
- zbytková vlhkost vázaná v prádle,
- odtah sušicího vzduchu
- a tepelné ztráty.



Obr. 5.1 – schéma sušičky jako „Black Boxu“

Není zde jasné, co a jakým způsobem se uvnitř děje. Proto je zapotřebí se zamyslet nad propojeností jednotlivých proudů uvnitř s ohledem na fyzikální a termodynamické zákonitosti.

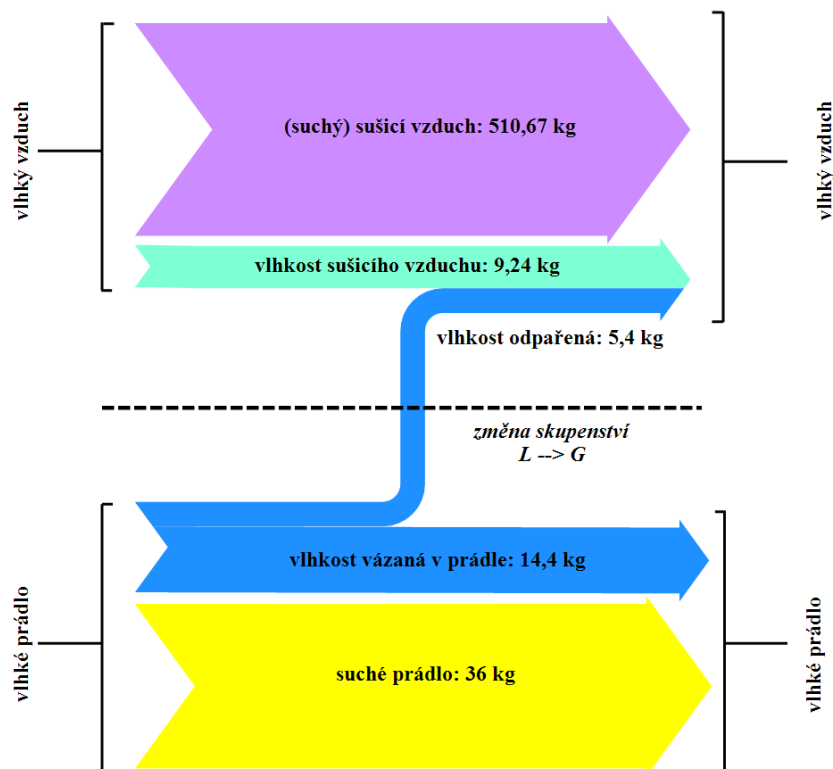
Následující schéma na obr. 5.2 podrobněji objasňuje průběh předpokládaných proudů uvnitř sušičky. Pára, která do systému vstupuje, předává ve výměníku kondenzační teplo sušicímu vzduchu a vystupuje ve formě kondenzátu. Ohřátý sušicí vzduch slouží pro ohřev sušeného prádla, ze kterého je nutné odstranit vázanou vlhkost, která se do prádla dostala v procesu mokrého praní. Vlhkost prádla se následně odpařuje a spolu se sušicím vzduchem odchází na recirkulační klapku, která určuje, kolik vzduchu odejde odtahem pryč a kolik vzduchu se vrátí zpět do oběhu. Neodpařená vlhkost vázaná v prádle pak odchází ze sušičky spolu s prádlem ve formě zbytkové vlhkosti.



Obr.5.2 – schéma předpokládaných vnitřních proudů sušičky

### Hmotnostní toky

Následující obr. 5.3 názorně zobrazuje hmotnostní toky operace sušení. Množství sušeného prádla v jedné dávce bylo zvoleno. Je to 36 kg suchého prádla. Vstupní vlhkost je dána výstupní vlhkostí prádla z kontinuální prací linky. V tomto případě je vlhkost prádla 55 %. Z toho je patrné, kolik vody je obsaženo v jedné dávce a kolik vody se odpaří ve formě páry, když je požadována výstupní vlhkost 40 %. Do systému vstupuje sušicí vzduch, který má také nějakou relativní vlhkost. Z prádla je odpařena část vlhkosti, která se na prádlo navázala při procesu mokrého praní. Tato odpařená vlhkost spolu s vlhkostí sušicího vzduchu následně odchází z prostoru bubny ven. Názorně je ukázána též změna skupenství, která při odpařování probíhá.

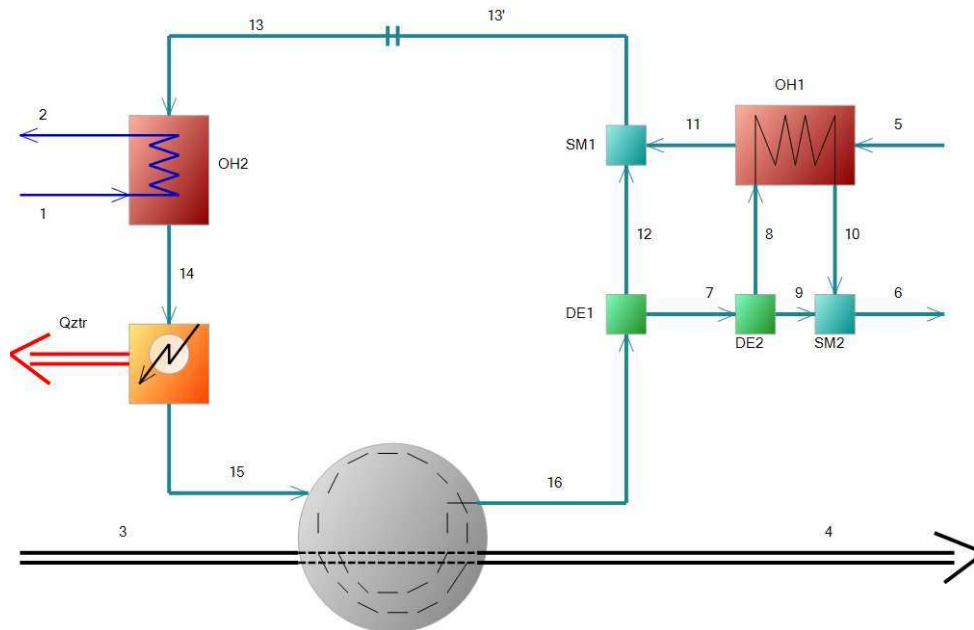


Obr.5.3 – hmotnostní toky operace sušení

## 5.2 Popis matematického modelu

Matematický model byl vytvořen v aplikaci MS Excel z důvodu celkové přehlednosti výpočtů, které jsou poněkud komplikovanější (z hlediska zadávání velkého množství vstupních dat). Tento program byl zvolen i přes to, že například použití matematického programu Maple by bylo výhodnějším řešením z pohledu implementace výpočtů.

Model simuluje funkci sušičky z hlediska energetické a hmotnostní bilance. Celý model je rozdělen na jednotkové operace, se kterými se následně pracuje (obr. 5.4). Princip sušení, z kterého navržený model vychází, je následovný. Do sušičky je nasáván čerstvý studený vzduch o teplotě 20 až 25 °C, který je přehříván pomocí páry na požadovanou teplotu (zvoleno 170 °C). Ohřátý vzduch je nasáván do bubny sušičky, ve kterém se odpařuje vlhkost vázaná v prádle. Teplota směsi odpařené vlhkosti a sušícího vzduchu je poměrně vysoká, tudíž se nabízí možnost jejího dalšího využití pro sušení. Proto matematický model zahrnuje recirkulaci a rekuperaci použitého vzduchu a umožňuje tak zahrnout i ohodnotit jejich přínos. Tyto operace jsou totiž u moderních sušiček běžně využívané, protože umožňují snížit spotřebu energie na ohřev sušícího vzduchu a tím dosáhnout významných energetických úspor.



Obr.5.4 – jednotkové operace schematickeho modelu sušičky

### Recirkulace

Významná část výstupní směsi vlhkého vzduchu je vrácena zpět na vstup do sušičky. V důsledku recirkulace je do systému přísáváno méně čerstvého vzduchu při zachování stejného průtoku i teploty sušicího vzduchu v bubnu sušičky. Čerstvý vzduch je tedy nahrazován recirkulací. Obecně platí, že na výstupu sušičky je koncentrace vodní páry v odtahovaném (použitém) vzduchu poměrně nízká a tedy stav výstupní směsi je velmi vzdálen teplotě rosného bodu. Z důvodu menšího množství čerstvého vzduchu na vstupu do systému odchází také menší množství vzduchu teplého, jehož nasycení vodními parami je ale vyšší. Proto se vlhkost v systému nehromadí, jenom se ustálí na vyšší hladině než v systému bez recirkulace. Jelikož je množství vzduchu na vstupu a výstupu ze systému nižší, je spotřeba energie na ohřev sušicího média mnohem nižší. Vyšší hladina relativní vlhkosti sušicího média se však může negativně projevit na rychlosti sušení.

### Rekuperace

Úkolem rekuperace je podobně jako u recirkulace snížení energie spotřebované pro ohřev sušicího média. U rekuperace se využije tepelný výměník. Přes tepelný výměník proudí použitý ohřátý proud sušicího vzduchu, který se ochlazuje tím, že předává teplo čerstvému sušicímu vzduchu vstupujícímu do sušičky. Výhodou je, že k předávání energie dochází bez toho, aby byly tyto dva proudy navzájem promíchány. Médium na vstupu má tedy stejnou absolutní vlhkost jako u systému bez rekuperace. Nevýhodou jsou vyšší investiční náklady vzhledem k nutnosti instalace vhodného tepelného výměníku. Další nevýhodou je vysoká míra relativní vlhkosti odcházejícího média, přičemž může při jeho ochlazení docházet ke kondenzaci par.

### 5.3 Popis výpočtu

V první řadě je potřebné zadat všechny hodnoty, které jsou voleny:

- hodnoty koncentrace suchého vzduchu pro jednotlivé složky [% obj.],
- relativní vlhkost proudu 13 -  $\phi_{13}$  [%],
- atmosférický tlak -  $p_{atm}$  [kPa],
- teplotu proudu 13 -  $t_{13}$  [°C],
- molární hmotnosti jednotlivých složek vlhkého vzduchu [kg/kmol],
- objemový průtok vzduchu -  $V_{13}$  [ $m_N^3/hod$ ],
- hustotu vzduchu -  $\rho$  [ $m^3/kg$ ],
- výparní teplo vody -  $l_{23}$  [J/kg],
- tlak páry -  $p$  [kPa],
- entalpie páry -  $h$  [kJ/kg],
- teplotu páry -  $t$  [°C],
- měrný objem páry -  $V_g$  [ $m^3/kg$ ],
- kondenzační teplo páry -  $q_{kond}$  [kJ/kg],
- teplotu na výstupu z ohřevu -  $t_{14}$  [°C],
- množství prádla v proudu 3 -  $\dot{m}_3$  [kg],
- teplotu vlhkosti v prádle na vstupu do sušičky -  $t_3$  [°C],
- vstupní a výstupní vlhkost prádla -  $x_{in}, x_{out}$  [%],
- teplotu vlhkosti v prádle na výstupu ze sušičky -  $t_4$  [°C],
- odpařovací kapacitu sušičky -  $c_{odp}$  [kg/min],
- poměr recirkulace děliče 1 a děliče 2 [%],
- účinnost ohříváče [%],
- teplotu proudu 10 -  $t_{10}$  [°C],
- a teplotu proudu 5 -  $t_5$  [°C].

Číslování proudů je znázorněno na obr.5.4. Prvním počítaným proudem je proud číslo 13. Vzhledem k tomu, že v této fázi výpočtu ještě není známo, kolik vzduchu o jaké teplotě a relativní vlhkosti se vrací za pomoci recirkulace do oběhu, je potřebné hodnoty teploty, relativní vlhkosti a tlaku vhodně zvolit.

Tlak je v celém systému atmosférický a jeho hodnota je:  $p_{atm} = 98 \text{ kPa}$ .

Pro výpočet objemových a hmotnostních koncentrací jednotlivých složek vlhkého vzduchu je zapotřebí vypočítat tlak nasycených par v přísávaném vzduchu a následně vypočítat koncentraci vodní páry ve vzduchu a to za pomoci Antoineovy rovnice:

$$\log p^0 = A - \frac{B}{c+t} \quad \rightarrow \quad p^0 = 10^{A - \frac{B}{c+t}} \quad [\text{kPa}], \quad (8)$$



kde  $A, B, C$  jsou konstanty Antoineova vztahu pro vodu [13],  $t$  je teplota vstupního vzduchu [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Objemový průtok vzduchu v proudu 13 ( $V_{13} [m_N^3/hod]$ ) je zvolen.

Dále se vypočítá hmotnostní podíl suchého vzduchu ( $x_{sv}$ ) a vodní páry ( $x_{vp}$ ) [%]. Poté se vypočte měrná entalpie vlhkého vzduchu proudu 13 dle vztahu:

$$\Delta h_i = c_{p_{stred}} \cdot (t_i - t_{ref}) + x_{vp} \cdot l_{23} \quad [J/kg], \quad (9)$$

kde,  $c_{p_{stred}} [J/kg.K]$  je střední tepelná kapacita vlhkého vzduchu,  $t_i [^{\circ}\text{C}]$  je teplota počítaného proudu a  $t_{ref} [^{\circ}\text{C}]$  je referenční teplota. Index  $i$  značí číslo proudu pro které se hodnota počítá.

Ve všech výpočtech měrné entalpie je referenční teplota volena:  $t_{ref} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Střední tepelné kapacity jsou počítané dle mocninného rozvoje:

$$C_{p_{stred}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c_p (dt)}{t_2 - t_1}, \quad [J/kg.K] \quad c_p = A + BT + CT^2 + DT^3 + \frac{E}{T^2}, \quad (10)$$

kde  $T [K]$  je teplota proudu, pro který je kapacita počítána,  $A, B, C, D, E$  jsou koeficienty mocninných rozvoju pro měrné teplo  $c_p$  jednotlivých složek vlhkého vzduchu v plynném stavu, které platí pro rozmezí teplot 273 až 1273 K [14].

Složení a hmotnostní průtok proudu 13,14 a 15 se nemění, mění se pouze teplota a relativní vlhkost.

První jednotková operace je ohřev OH2 čerstvého vzduchu párou. Jelikož teplota  $t_{14}$  je volena, vypočte se dle vzorce (9) měrná entalpie proudu 14 -  $h_{14}$ .

Relativní vlhkost proudu 14 -  $\varphi_{14}$  [%] se vypočte dle vztahu (11):

$$\varphi_i = \frac{c_{H2O,i} \cdot p_{atm}}{10 \left( A - \frac{B}{C + t_i} \right)} \quad [\%], \quad (11)$$

kde  $c_{H2O,i} [\% \text{ obj.}]$  je koncentrace vodní páry ve vlhkém vzduchu v proudu  $i$ , a  $A, B, C$  jsou v tomto případě konstanty Antoineovy rovnice.

Z jednoduché bilanční rovnice (12) uzlu ohřev OH2 se vypočítá teplo, které je potřeba dodat parou proudu 13, tak aby se ohřál na požadovanou teplotu. Následně se vypočte množství potřebné páry, která toto teplo dodá.

U každé jednotkové operace platí jednoduché hmotnostní pravidlo, a to co do uzlu přiteče, to musí odtéct. U všech výpočtů měrných entalpií jednotlivých proudů je tedy princip výpočtu stejný a nebude dál podrobně popisován, vzhledem k tomu, že jednotlivé rovnice, dle kterých se entalpie počítají, jsou napsány přímo u výpočtu v Excelu. Hodnoty proudu na výstupu z jednoho uzlu jsou následně použity jako vstupní hodnoty k výpočtu další jednotkové operace.

$$m_i \cdot h_i + Q_p = m_{i+1} \cdot h_{i+1} \qquad Q_p = m_1 \cdot q_{kond} \qquad (12)$$

Tepelné ztráty prostupem tepla do okolí jsou označené na obr. 5.4 schematicky jako jednotková operace chlazení. Pro výpočet těchto tepelných ztrát sušičky je nutno použít dílčí výpočet v programu Maple, který bude popsán v kapitole 7.

Další jednotkovou operací je samotné sušení. Z vypočtených vstupních dat proudu 15 a ze známých vstupních a výstupních dat proudů 3 a 4 (prádlo a vlhkost vázaná v něm) se dopočítají hodnoty entalpie a hmotnostní průtok proudu 16. Při odpařování vlhkosti zde dochází ke změně skupenství u vody z kapalného na plynné.

Teplotu proudu za každou jednotkovou operací je možné vypočítat následovně (13):

$$t_i = \frac{h_i - x_{vp} \cdot l_{23}}{c_{p_{stred}}} \quad [^{\circ}C], \qquad (13)$$

kde  $t_i [^{\circ}C]$  je počítaná teplota proudu  $i$ ,  $h_i [J/kg]$  je měrná entalpie proudu  $i$ .

Následuje dělič 1, který dle zvoleného dělicího poměru určí množství vlhkého vzduchu, který se následně využije k recirkulaci. Od toho se pak odvíjí hodnoty následujících proudů.

Hodnoty měrných entalpií, teplot a relativních vlhkostí jsou u proudů 12, 7, 8 a 9 stejné vzhledem k tomu, že dělič rozděluje proudy pouze z hlediska objemového.

Dělič 2 určuje množství použitého vlhkého vzduchu, které se využije k rekuperaci s tím, že teplota na výstupu z tepelného výměníku je volena ( $t_{10} [^{\circ}C]$ ).

Teplota předehřátého vzduchu v proudu 11 je pak závislá na množství vzduchu v proudu 8. Teplotu výstupního proudu (proud číslo 6) určí směšovač 1 na základě jednoduchého bilančního výpočtu a následně dle rovnice (13).

Měrná entalpie, teplota a množství proudu 13' se určí dle iterační podmínky (14):

$$(v'_{13,H2O} - v'_{13',H2O})^2 = 0, \qquad (14)$$

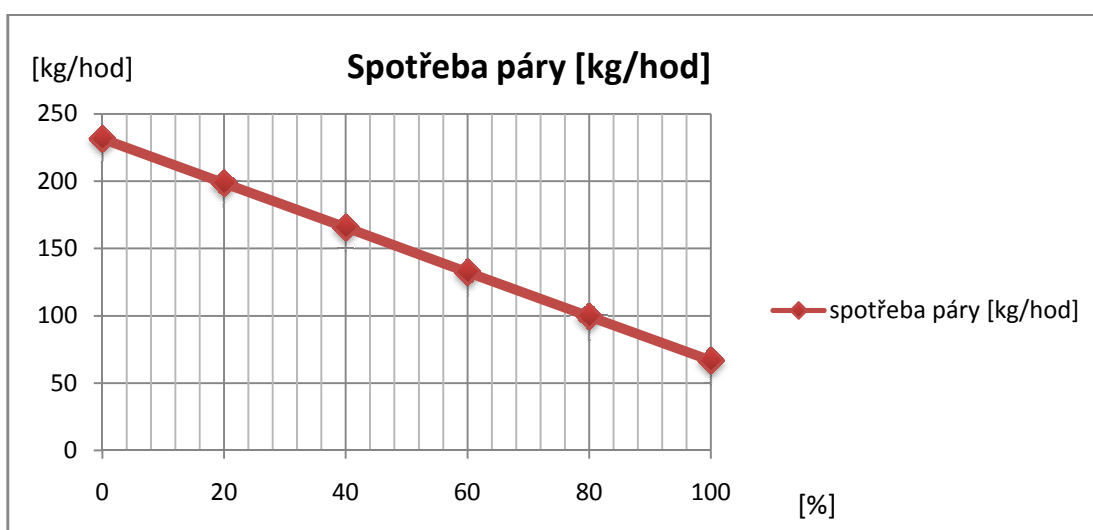
kde  $v_{13,H2O}$  je měrný objemový průtok vody ve vlhkém vzduchu v proudu 13 a  $v_{13',H2O}$  je měrný objemový průtok vody ve vlhkém vzduchu v proudu 13'. Pomocí této iterační podmínky se použitím „řešitele“ dopočítá vstupní vlhkost proudu 13 (měněná buňka), podmínkou je zadání stejné teploty jako u proudu 13'.

Při testování modelu bylo pozorováno, že nejlepší nastavení děliče 1 (zajišťuje recirkulaci vzduchu) je nastavit průtok vráceného vzduchu na 80 % a dělič 2 nastavit tak, aby bylo využito co nejvíce teplého vzduchu k rekuperaci. Nejideálnější by bylo zavést rekuperaci stoprocentní. Spotřeba páry by byla mnohem nižší než u systému bez rekuperace. Porovnání různých nastavení děličů je v tab. 5.1. Závislost množství vzduchu v rekuperaci na množství zobrazuje také graf 5.1.

Nastavení matematického modelu pro ukázkou bylo následovné. Objemový průtok vzduchu byl nastaven na  $4500 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ , dělič 1 byl nastaven na 50% recirkulaci vzduchu, množství jedné dávky bylo zvoleno 36 kg, množství vody, kterou je potřeba odpařit, je tedy 5,4 kg.

množství vzduchu použito k rekuperaci [%]	spotřeba páry [kg/hod]	celková spotřeba páry na odpaření požadovaného množství vody z jedné dávky prádla [kg]
0	231,55	12,61
20	198,56	10,81
40	165,57	9,01
60	132,41	7,21
80	99,57	5,42
100	66,58	3,63

Tab. 5.1 – srovnání spotřeby páry při různém nastavení rekuperace použitého vzduchu

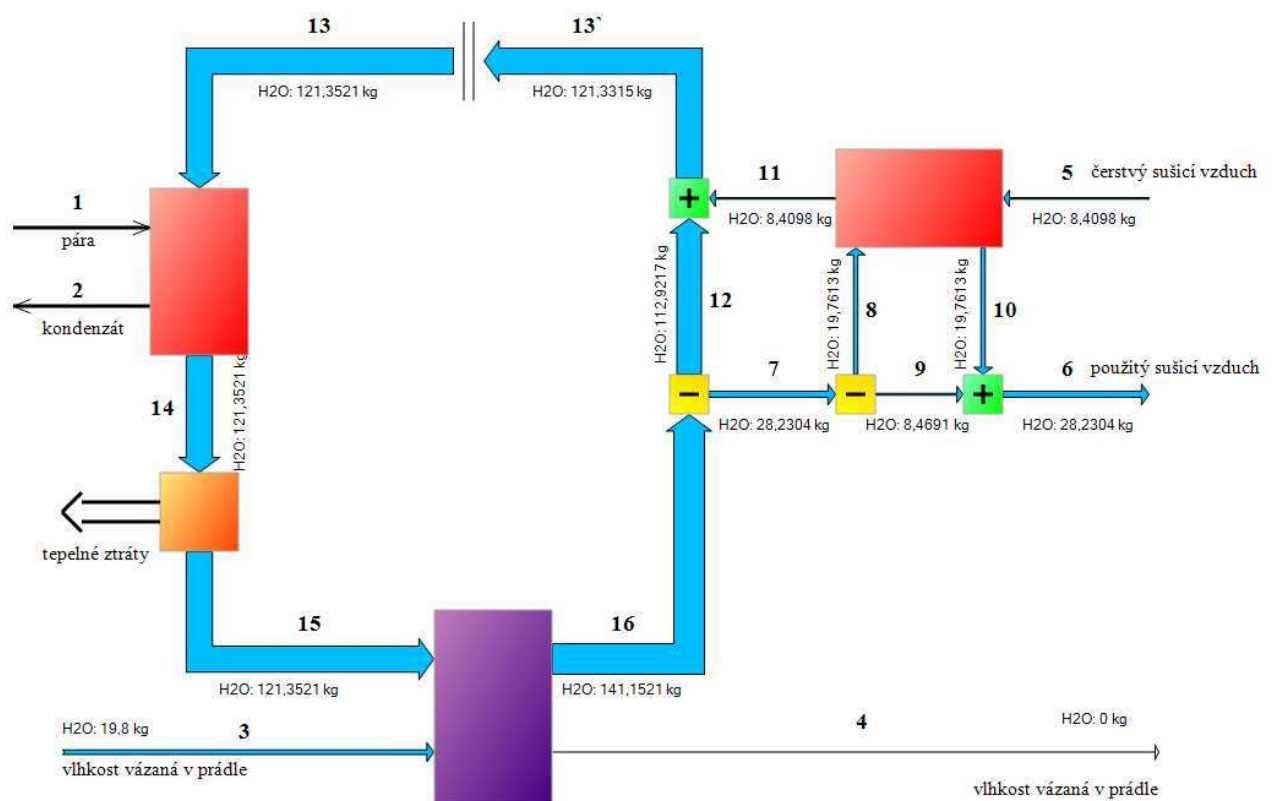


Graf 5.1 – závislost množství páry na množství vzduchu v rekuperační jednotce

Je potřeba podotknout, že spotřeba páry je počítána při stálé odpařovací kapacitě. V reálném provozu se vypočtených hodnot spotřeby páry dosahuje velice obtížně. Nepříznivě na spotřebu páry působí i množství prisávaného sušícího vzduchu. V praxi to znamená, že čím víc vzduchu je na vstupu do sušičky, tím je potřebné větší množství páry pro jeho ohřev. Ovšem malé množství vzduchu by mohlo negativně ovlivnit odpařovací kapacitu, a to z důvodu vyšší koncentrace par, a tedy vyšší relativní vlhkosti při využití vzduchu k recirkulaci.

Podobnou tabulku jako je tab. 5.1 však pro recyklační klapku v tomto případě není možno sestavit. Navrhnutý matematický model totiž počítá s pevně danou odpařovací kapacitou. A to z toho důvodu, že při recirkulaci se odpařovací kapacita snižuje, zatímco při rekuperaci ne. Avšak v případě, že by byla odpařovací kapacita dopočítávaná v závislosti na vlhkosti a množství sušícího vzduchu, je možné tabulku sestavit.

Další ukázka jiného nastavení matematického modelu je na obr. 5.5( více viz příloha [P3]), který znázorňuje průtoky vlhkosti v jednotlivých proudech. Množství použitého sušícího vzduchu je  $4500 \text{ m}_N^3/\text{hod}$ . Prádlo je v tomto případě sušeno do sucha. Dělič 1 je nastaven tak, že do oběhu vrací 80 % použitého vzduchu, a dělič 2 je nastaven tak, že k rekuperaci je využito 70 % vlhkého vzduchu.



Obr.5.5 – tok vlhkosti v sušičce

## 5.4 Ověření matematického modelu

Prvním krokem k ověření naměřených dat je nastavení matematického modelu sušičky, zadáním vstupních dat, které byly naměřeny nebo nastaveny v reálném provozu v den měření. Tab. 5.2. uvádí tyto nastavené hodnoty a naměřené data z provozu.

Vstupní veličiny reálné sušičky	Hodnota	Poznámka
výkon ventilátoru [ $m_N^3/\text{hod}$ ]	6000	naměřeno - přibližná hodnota
množství recirkulovaného vzduchu [%]	50	nastaveno
množství vzduchu na výstupu se sušičky [ $m_N^3/\text{hod}$ ]	3000	naměřeno - přibližná hodnota
množství prádla v jedné dávce [kg]	36	určeno vážením
čas odpařování [s]	196	určeno měřením
průměrná odpařovací kapacita [ $l_{H_2O}/\text{min}$ ]	1,632	určeno vážením

Tab. 5.2 – hodnoty z reálného provozu

Do matematického modelu jsou zadány následující vstupní data:

- výkon ventilátoru – množství vzduchu, které proudí v systému v uzavřeném toku  
 $\dot{V}_{13} = 6000 m_N^3/\text{hod}$ ,
- poměr děliče  
 $1 - r - 100 = 50 \%$ ,
- množství prádla v jedné dávce  
 $\dot{m}_3 = 36 \text{ kg}$
- a průměrná odpařovací kapacita  
 $c_{odp} = 1,632 l_{H_2O}/\text{min}$ .

Po zadání dat byl proveden výpočet. V dalším kroku jsou porovnány hodnoty vypočtené modelem s naměřenými hodnotami, které uvádí tab. 5.3.

Veličina	Model	Měření
množství vzduchu na výstupu se sušičky [ $m_N^3/\text{hod}$ ]	3003,36	3000
množství odpařené vody z jedné dávky [kg]	5,4	5,325
celková spotřeba tepla za čas odpařování [MJ]	16,895	21,449
celková spotřeba páry za čas odpařování [kg]	8,39	10,53
celková měrná spotřeba páry na 1 kg odpařené vody [ $\text{kg}/\text{kg}_{H_2O}$ ]	1,604	1,977

Tab. 5.3 – porovnání výsledků modelu s experimentálně zjištěnými daty

Z tab. 5.3 je patrné, že vypočtené hodnoty spotřeby tepla a páry (10 bar) jsou nižší. To je možné odůvodnit tím, že nastavený model počítá s teoretickými tepelnými ztrátami prostupem tepla. Zatímco pro určení celkové spotřeby tepla a páry při měření byli tepelné ztráty do okolí určeny odhadem. Celková měrná spotřeba páry jak výpočtem tak při měření vychází poměrně malá. Výrobce udává katalogová hodnota v systému bez recirkulace je 2,5  $\text{kg}/\text{kg}_{H_2O}$  [3].

## 6. Matematický model kalandru

Dalším vytvořeným matematickým modelem je model kalandru, který je podrobně popsán níže v této kapitole.

### 6.1 Kalandr jako „Black Box“

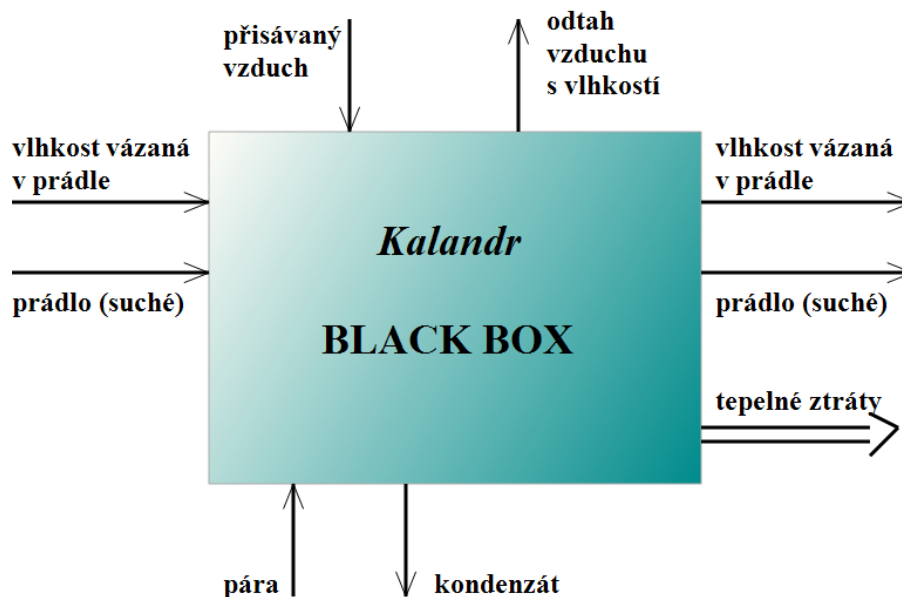
Aby bylo možné provést návrh kalandru, je zde také nutnost vytvořit si představu o tom jak zařízení pracuje. Proto byl podobně jako u sušičky prvotním návrhem kalandru „black box“ (viz obr. 6.1), který objasňuje pouze směry jednotlivých proudů. Nejsou zde uvažovány parametry jednotlivých proudů.

Vstupy jsou:

- pára,
- prádlo (suché),
- vlhkost vázaná v prádle
- přísávaný sušicí vzduch.

Výstupy jsou:

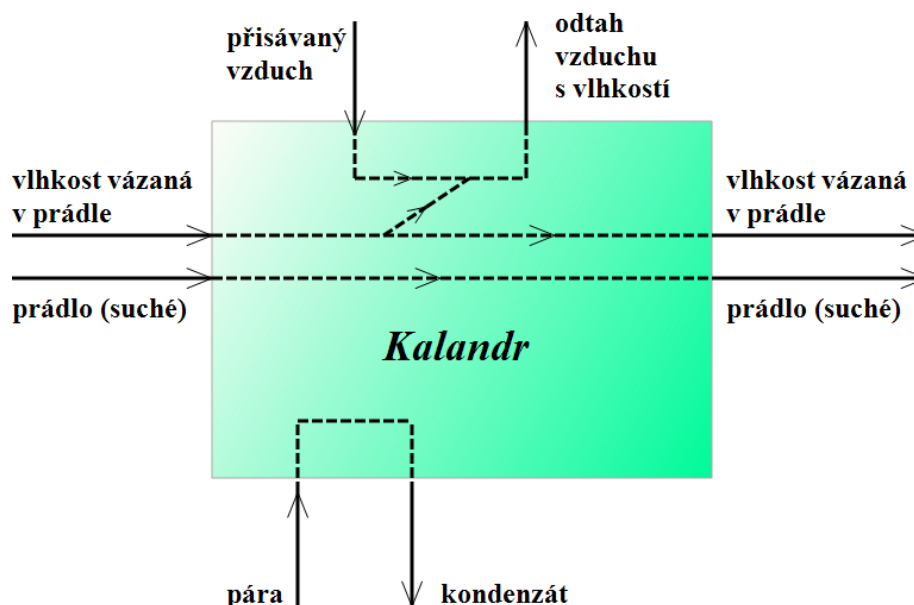
- kondenzát,
- prádlo (suché),
- zbytková vlhkost vázaná v prádle,
- odtah sušicího vzduchu s vlhkostí
- tepelné ztráty.



Obr.6.1 – schéma kalandru jako Black Boxu

Pro další objasnění slouží schéma na obr. 6.2, které podrobněji přibližuje předpokládaný průběh jednotlivých proudů uvnitř kalandru. Pára vstupující do jednotlivých válců kalandru ohřívá teplosměnnou plochu koryta kalandru a vystupuje ve formě kondenzátu. Vlhké prádlo, které prochází zařízením je v kontaktu s vyhřívanou teplosměnnou plochou, kde dochází k přenosu tepla a následnému odpařování vlhkosti z prádla. Sušicí vzduch je společně s odpařenou vlhkostí odtahován z prostoru kalandru. Část vlhkosti vázané v prádle pak odchází z kalandru spolu s prádlem. Nejedná se ovšem o vlhkost, kterou prádlo na sebe navázalo při

procesu mokrého praní, ale o tzv. chemicky vázanou vlhkost. Tato vlhkost je součástí každé chemické struktury textilií. Je způsobena krystalickou vodou. Tato voda tvoří s vláknem chemickou sloučeninu, která vzniká vazbou vody s vlákny za pomoci vodíkových můstků. Chemicky vázanou vlhkost je možné odstranit pouze vysokou teplotou, která by převyšovala bod varu vody. Ovšem odstraněním chemické vlhkosti by došlo k rozrušení struktury vlákna, což má za následek negativní zpracovatelské vlastnosti jako jsou pevnost, tažnost, barva aj.



Obr.6.2 – schéma předpokládaných vnitřních proudů kalandru

## 6.2 Popis matematického modelu

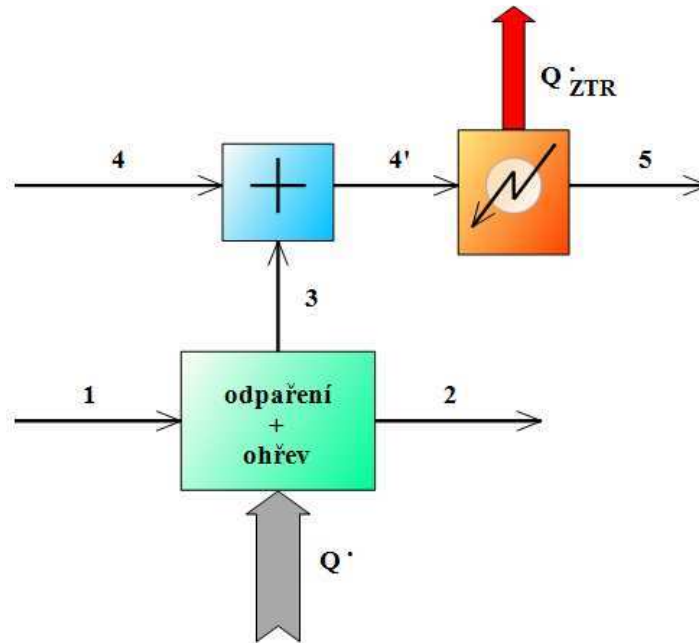
Matematický model byl vytvořen v prostředí aplikace MS Excel. Model simuluje funkci kalandru z hlediska energetické a hmotnostní bilance. Stejně jako u sušičky je také rozdělen na jednotkové operace, se kterými se následně pracuje (viz obr. 6.3). Výpočet je ovšem rozdělen do několika částí:

- výpočet při 0% vytížení plochy kalandru,
- výpočet při 100% vytížení plochy kalandru
- a výpočty při reálnem využití plochy kalandru u jednotlivých typů prádla.

Princip sušení, ze kterého navržený model vychází je následovný. Do prostoru kalandru je proudem 4 vtahováno vlhké prádlo. K přenosu tepla dochází při kontaktu vlhkého prádla s parou ohřátým teplosměnným povrchem. Následně dochází k odpařování vlhkosti z prádla. Vzniklá vodní pára (proud 3) se smíchá s čerstvým vzduchem, který je přisáván do prostoru kalandru proudem 4. Vzniklá směs proudí proudem 4' do fiktivního chladiče, jež zastupuje tepelné ztráty, a proudem číslo 5 následně odchází ven z kalandru.

V matematickém modelu kalandru je snaha o podrobnější popsání spotřeby energie. Zaměřuje se hlavně na popis tepelných ztrát. Přibližuje tedy jak výrazná je tepelná ztráta, ke které dochází

při neúplném využití kalandrovací plochy pro jednotlivé typy prádla (jednotlivé typy prádla zabírají pouze x % kalandrovací plochy viz tab. 6.1). Tepelnou ztrátu totiž z velké části určuje část nevyužitá kalandrovací plochy, jež ohřívá sušící vzduch, který je bez užitku odváděn ven z kalandru.



Obr. 6.3 – jednotkové operace schematického modelu kalandru

### 6.3 Popis výpočtu

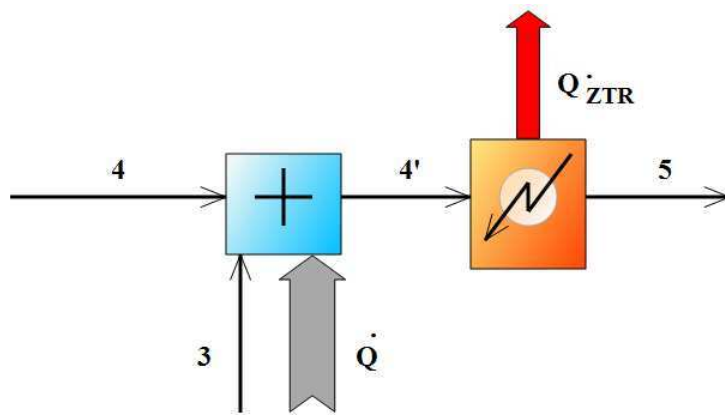
V prvním kroku je potřebné zvolit vstupní hodnoty páry a parametry kalandru:

- tlak páry –  $p$  [bar],
- kondenzační teplo páry –  $q_{kond}$  [kJ/kg],
- měrná entalpie páry –  $h_6$  [kJ/kg],
- množství páry –  $\dot{m}_6$  [kg/hod],
- počet válců –  $n$  [-],
- průměr jednoho válce –  $D$  [mm],
- šířka jednoho válce –  $B$  [mm],
- uhel opásání válce korytem –  $\alpha$  [°],
- množství vzduchu na výstupu z kalandru –  $\dot{V}_5$  [ $m_N^3$ /hod]
- a identifikační číslo prádla.

#### 6.3.1 0% využití plochy kalandru

Následuje výpočet, který uvažuje s 0 % využitím plochy kalandru. To znamená, že do prostor kalandru není vtahováno žádné prádlo a tudíž kalandr pracuje „na prázdko“. Schematické znázornění je na obrázku (obr. 6.4).





Obr. 6.4 – jednotkové operace kalandru při 0 % využití plochy

První jednotkovou operací, která je zde počítaná je směšovač. K výpočtu teploty a měrné entalpie výstupního proudu číslo 4' je zapotřebí následujících kroků.

Dle vzorce (15) se vypočítá výkon koryt:

$$Q = q_{kond} \cdot \dot{m}_6, \left[ \frac{kJ}{hod} \right] \quad (15)$$

Vzhledem k tomu, že parou vyhříváné koryto ohřívá pouze sušící vzduch, který je následně bez užitku odtahován ven, je tepelná ztráta ( $Q_k [J/hod]$ ) zvolena jako procento vypočteného výkonu koryt.

Poté se zvolí vlastnosti vstupujícího vzduchu a následně se vypočítá jeho množství z jednoduché hmotnostní bilance (16) uzlu směšovač:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_{4'} - \dot{m}_3 [kg], \quad (16)$$

kde  $\dot{m}_4 [kg]$  je množství čerstvého vzduchu v proudu 4 na vstupu do systému,  $\dot{m}_{4'} [kg]$  je množství směsi čerstvého vzduchu a odpařené vlhkosti a  $\dot{m}_3 [kg]$  je množství odpařené vlhkosti z prádla.

V tomto případě ovšem do kalandru žádné prádlo nevstupuje, tudíž je množství odpařené vody  $\dot{m}_3 [kg]$  rovno nule a množství vstupujícího vzduchu se rovná množství vystupujícímu vzduchu.

Tlak nasycených par v přísávaném vzduchu a následná koncentrace vodních par se určí dle vztahu 8.

Ze zvoleného objemového průtoku vzduchu na výstupu ze systému (proud 4') se vypočítá hmotnostní podíl suchého vzduchu ( $x_{sv}$ ) a vodní páry ( $x_{vp}$ ) [%]. Poté se vypočítá měrná entalpie

vlhkého vzduchu proudu 4, dle vztahu číslo (9). I zde jsou střední tepelné kapacity počítány stejným způsobem pro každou jednotkovou operaci (jako u sušičky), a to dle vztahu číslo (10) a nebudou dále popisovány.

Následně za použití stejného principu jako u sušičky se pomocí bilanční rovnice (12) vypočítá měrná entalpie proudu 4'. Poté se dle rovnice (13) zjistí teplota tohoto proudu.

Tepelné ztráty prostupem tepla do okolí jsou na obr. 6.4, stejně jako u sušičky, označené schematicky jako jednotková operace chlazení. Pro výpočet těchto ztrát je nutno použít dílčí výpočet v programu Maple (viz kapitola 7).

Po zjištění tepelných ztrát se za pomoci bilanční rovnice číslo (12) (její vhodnou úpravou) dopočte měrná entalpie proudu 5. A pomocí rovnice číslo (13) se vypočítá teplota tohoto proudu.

### **6.3.2 100% využití plochy kalandru**

V této části výpočtu jsou počítány jednotkové operace dle obr. 6.3.

V prvním kroku je z rozměrů „ideální“ plachty vypočtena její plocha. Šířka plachty je rovna šířce kalandru a její délka je závislá na rychlosti posuvu prádla. Z plochy plachty a gramáže se dopočte hmotnost plachty, která projde kalandrem za hodinu.

Předpokládá se, že prádlo na vstupu do kalandru bude mít relativní vlhkost stejnou jakou mělo na výstupu ze sušičky. Teplota prádla vstupujícího do kalandru, ale nebude totožná s teplotou po výstupu ze sušičky. To je způsobeno nekontinuálním provozem kalandru. Proto je teplota prádla na vstupu do kalandru volena.

Střední tepelná kapacita vody je počítána dle následujícího vztahu (17):

$$C_{p_{stred}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c_p (dt)}{t_2 - t_1}, \quad \left[ \frac{J}{kg} \cdot K \right] \quad C_p = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad (17)$$

kde  $T [K]$  je teplota proudu, pro který je kapacita počítána,  $A, B, C, D, E$  jsou koeficienty mocninných rozvoju pro měrné teplo  $c_p$  vody v kapalném stavu, které platí pro rozmezí teplot 273,16 až 533,16 K [14].

Pomocí dílčího výpočtu, který je blíže popsán v kapitole číslo 7, se vypočítá množství odpařené vody ( $\dot{m}_3$ ) v proudě 3, množství vody ( $\dot{m}_2$ ), které zůstalo v prádle v proudě 2, a teplo ( $Q_{oh}$ ) potřebné na ohřev této zbytkové vlhkosti. Z množství odpařené vody podělené plochou kalandru se zjistí odpařovací kapacita.

Následně se dopočítá teplo, které je použito k odpaření vody z prádla, jako rozdíl celkového tepla dodaného parou a tepla potřebného pro ohřev zbytkové vlhkosti.

Dalším krokem jsou výpočty měrných entalpií proudů 1 a 2 pro prádlo i vlhkost v něm vázanou:

$$\Delta h_i = cp_{stred} \cdot (t_i - t_{ref}) \quad [\text{J/hod}], \quad (18)$$

kde  $cp_{stred}$  [J/kg.K] je buď střední tepelná kapacita vody, nebo v případě výpočtu měrné entalpie prádla je to tepelná kapacita prádla, která je volena,  $t_i$  [°C] je teplota počítaného proudu a  $t_{ref}$  [°C] je referenční teplota. Index  $i$  značí číslo proudu pro které se hodnota počítá.

Ve všech výpočtech měrné entalpie je referenční teplota volena:  $t_{ref} = 0$  °C.

Hmotnostní bilancí (co do uzlu přiteče, to musí také odtéct) uzlu ohřev + odpaření se dopočítá měrná entalpie proudu 3.

Poté následuje výpočet proudu 4, 4' a proudu 5 stejným postupem, jako byl popsán výpočet při 0% využití plochy kalandru.

### **6.3.3 Reálné využití plochy kalandru**

K výpočtu reálného využití plochy kalandru slouží pomocný výpočet „prádlo“. Ten je umístěn na prvním listu s názvem „prádlo“, který se nachází v matematickém modelu [P2]. Zde se vypočítají hmotnostní podíly, množství vody, kterou je nutno odpařit, reálna plocha využití kalandru a další veličiny.

Při výpočtu reálného využití kalandru pak stačí zadat číslo typu prádla od 1 do 6. A tím se určí reálné vytížení plochy kalandru, s kterým se následně počítá. Přehled typů prádla uvádí tab. 6.1.

ID	NÁZEV	ŠÍRKA	DÉLKA	ŽEHLENO V i DRAHÁCH	MINIMÁLNÍ PERIODA VKLÁDÁNÍ	VYUŽITÍ PLOCHY KALANDRU
		[mm]	[mm]	i [1]	[s]	[%]
1	Prostěradlo (jedno lůžko)	2400	1500	1	2	83,92
2	Povlak příkrývky (jedno lůžko)	2000	1500	1	2	69,93
3	Povlak polštáře	600	500	3	2	48,86
4	Ubrus 1	2200	1450	1	2	76,92
5	Ubrus 2	1450	1450	1	2	50,70
6	Rouška	500	500	4	2	27,50

Tab. 6.1 – typy prádla

Zde je zapotřebí vhodně zvolit rychlost posuvu tak, aby se odpařila nejlépe všechna voda obsažená v prádle. Jako pomůcka poslouží hodnota rychlosti posuvu (hodnota bude přibližně stejná) uvedená u jednotlivých typů prádla z listu „prádlo“.

Vzhledem k tomu, že vybraný typ prádla zabírá jenom  $x$  % kalandrovací plochy je dopočítáno kolik vody je obsaženo v  $x$  % prádla, které by zabíralo 100 % plochy kalandru při zvolené rychlosti.

Teplo ( $Q_{n.pl.}$ ) nevyužití plochy kalandru bez užítu ohřívá sušící vzduch a jedná se teda o tepelnou ztrátu a jeho hodnota se zjistí dle následujícího výpočtu (19):

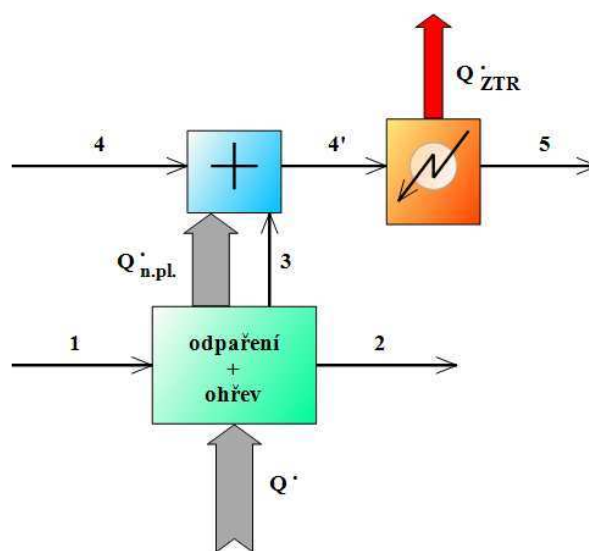
$$\frac{100-x}{100} \cdot Q_k = Q_{n.pl.} \quad [J/hod], \quad (19)$$

kde  $x$  [%] je využití plochy kalandru u jednotlivých typů prádla,  $Q_k$  [J/hod] je tepelná ztráta při 0% využití plochy kalandru. Názorné ukázky hmotnostní a energetické bilance kalandru jsou uvedeny v příloze [P4].

Teplo ( $Q_{odp\_oh}$  [J/hod]) potřebné na odpaření vody z prádla a na ohřev prádla se vypočítá dle (20):

$$Q_{odp\_oh} = Q - Q_{n.pl.} \quad \left[ \frac{J}{hod} \right] \quad (20)$$

Výpočet je poté totožný s výpočtem při 100% využití plochy kalandru. Pro výpočet množství odpařené a zbytkové vody je zapotřebí použít dílčí výpočet popsany v kapitole 7. Při výpočtu měrné entalpie proudu 3 je nezbytné při energetické bilanci uzlu ohřev + odpaření uvažovat s teplem  $Q_{n.pl.}$  dle obr. 6.5.



Obr. 6.5 – jednotkové operace kalandru při reálném využití plochy kalandru

## 6.4 Ověření matematického modelu

Prvním krokem k ověření naměřených dat je nastavení matematického modelu kalandru, zadáním vstupních dat, které byly zjištěny při měření v reálném provozu v den měření. Následující tab. 6.2 udává naměřené hodnoty, dle kterých byl matematický model nastaven.

Vstupní veličiny kalandru	Hodnota	Poznámka
hmotnost prádla před vstupem do kalandru [kg]	130,6	zjištěno vážením
hmotnost prádla na výstupu z kalandru [kg]	82,8	zjištěno vážením
šířka jedné plachty [m]	2	měřeno
délka jedné plachty [m]	1,4	měřeno
počet kusů za měřený interval [ks]	95	spočítáno
doba intervalu [s]	840	zjištěno měřením
rychlost posuvu [m/min]	9	nastaveno

Tab. 6.2 – vstupní data zjištěny na kalandru a zároveň vstupní data pro matematický model

Po zadání vstupních dat do matematického modelu následoval výpočet teoretických hodnot, které jsou s naměřenými daty porovnány v tab. 6.3.

Do matematického modelu jsou zadány následující vstupní data:

- rozměry plachty,
- celková hmotnost prádla za časový interval,
- časový interval
- a rychlost posuvu.

Veličina	Model	Měření
množství odpařené vody za časový interval [kg]	52,24	47,8
průměrná odpařovací kapacita [ $l_{H_2O}/min$ ]	3,731	3,418
teplo na odpaření vody [MJ]	142,65	119,5
teplo na ohřev vzduchu [MJ]	4,42	35,14
teplo na krytí tepelných ztrát [MJ]	4,456	17,925
spotřeba páry na odpaření vody [kg]	69,4	58,665
spotřeba páry na ohřev vzduchu [kg]	2,15	17,251
spotřeba páry na krytí tepelných ztrát [kg]	2,17	8,8
celková spotřeba páry [kg]	73,72	84,72
měrná spotřeba tepla na odpaření vody [ $MJ/kg_{H_2O}$ ]	2,73	2,5
měrná spotřeba tepla na ohřev vzduchu [ $MJ/kg_{H_2O}$ ]	0,085	0,735
měrná spotřeba tepla na krytí tepelných ztrát [ $MJ/kg_{H_2O}$ ]	0,085	0,375

Tab. 6.3 – porovnání naměřených dat s hodnotami teoretickými

Naměřené i vypočtené hodnoty jsou při 69,93% využití plochy kalandru. Při porovnání hodnot naměřených a vypočtených je vidět znatelný rozdíl v množství tepla potřebného pro ohřev vzduchu. Velice nízkou hodnotu tepla pro ohřev vzduchu je možné odůvodnit tím, že matematický model je nastaven tak, aby bylo počítáno pouze z volitelným procentem tepla z nevyužité plochy, která ohřívá vzduch. Hodnota tohoto, tepla která byla zjištěna při měření počítá se 100% využitím tepla z nevytížené části plochy koryta kalandru pro ohřev. Také teplo potřebné na krytí tepelných ztrát do okolí prostupem tepla je u měření udáno pouze odhadem. Je ovšem nutné podotknout, že vypočtené tepelné ztráty počítají s odhadnutými teplotami stěn uvnitř i zvenčí kalandru a po zadání naměřených hodnot budou určitě vyšší.

Dále je možné konstatovat, že matematický model má při nižší spotřebě páry vyšší průměrnou odpařovací kapacitu. Za časový interval, při kterém měření proběhlo, je množství odpařené vody větší, než bylo zjištěno při reálnem provozu. To je způsobeno větším množstvím tepelných ztrát, při nerovnoměrném vkládání jednotlivých kusů prádla do kalandru.

## 7. Popis dílčích výpočtů

Pro výpočty matematických modelů bubnové sušičky s parním ohřevem a kalandru je zapotřebí použít dílčí výpočty, které byly vytvořeny v prostředí programu Maple. Tyto výpočtové nástroje jsou obsahem elektronické přílohy.

Jednotlivé dílčí výpočty jsou určeny pro:

- výpočet tepelných ztrát prostupem tepla do okolí pro sušičku a kalandr,
- iterační výpočet spotřeby tepla na odpaření vlhkosti a na ohřev zbytkové vlhkosti u kalandru
- a iterační výpočet spotřeby tepla na odpaření vlhkosti a na ohřev zbytkové vlhkosti u kalandru při reálném využití plochy.

### 7.1 Výpočet tepelných ztrát

Výpočet slouží k teoretickému určení tepelných ztrát prostupem tepla do okolí. Používá se jak u sušičky tak u kalandru [P5].

Ukázka zadávání vstupních dat je popsána v aplikaci u jednotlivých kroků výpočtu. Postup výpočtu je následovný:

- zadání vstupních dat a fyzikálních vlastností při daných teplotách uvnitř systému (teplota média uvnitř a teplota stěny, kterou je potřebné odhadnout),
- výpočet Reynoldsova čísla, Prandtlova čísla a Grashofova čísla pro proudění uvnitř systému,
- určení oblasti proudění (turbulentní tok, laminární tok nebo přechodná oblast),
- výpočet součinitele přestupu tepla pro danou oblast proudění,
- zadání vstupních dat a fyzikálních vlastností při daných teplotách (teplota okolí a teplota stěny zvenčí, kterou je také potřeba odhadnout),
- výpočet Reynoldsova čísla, Prandtlova čísla a Grashofova čísla pro proudění zvenčí sušičky, nebo kalandru,
- výpočet součinitele přestupu tepla při volné konvekci
- a výpočet hodnoty tepelných ztrát v  $[kJ/hod]$ ,  $[W]$ .

Hodnoty dynamických viskozit pro vlhký vzduch je potřebné dohledat v tabulkách. Teploty stěn povrchu nejsou naměřeny, jsou určeny pouze odhadem. Výpočtový nástroj je ovšem připraven k použití v reálném provozu, až budou k dispozici naměřená skutečná data.

## **7.2 Výpočet tepla pro ohřev zbytkové vlhkosti**

Dílčí výpočet „iterace pro kalandr“ [P6], slouží k přesnému výpočtu energie potřebné k ohřátí zbytkové vlhkosti v prádle, která se při nesprávném nastavení například rychlosti posuvu nestihne odpařit.

Prvním krokem je zadání vstupních dat, která jsou podrobně popsána přímo ve výpočtu u jednotlivých kroků. Poté následuje samotný iterační výpočet, pomocí kterého je vypočteno množství odpařené vody, a množství zbytkové vlhkosti, která se z prádla nestihne odpařit. A množství energie potřebné na ohřátí této vlhkosti na výstupní teplotu.

Tyto hodnoty je následně potřebné zapsat do matematického modelu kalandru.

## **7.3 Výpočet tepla pro ohřev zbytkové vlhkosti při reálném využití plochy kalandru**

Tento výpočtový nástroj slouží pro výpočet množství tepla pro ohřev zbytkové vlhkosti v prádle pouze při reálném využití plochy kalandru [P7].

Princip a postup výpočtu je totožný s předchozím výpočtem – iterace pro kalandr. Ovšem zde je nadefinován další vstupní parametr a to tepelná ztráta nevyužité plochy kalandru.



## 8. Rozšíření výpočtového systému W2E

### 8.1 W2E „Waste-to-energy“

W2E je simulační program, který je vyvíjen na Ústavu procesního a ekologického inženýrství FSI VUT v Brně ve spolupráci s Fakultou Informačních Technologií. Vznikl na základě podpory výzkumného záměru MSM 0021630502 „Ekologicky a energeticky řízené soustavy zpracování odpadu a biomasy“[15]. Lze ho charakterizovat jako modulárně - stavebnicově koncipovaný simulační programový systém založený na hmotnostní a energetické bilanci technologických uzlů. V budoucnu má být rozšířen o prvky pro návrhové výpočty procesů a zařízení.

System je určen hlavně pro rychlé inženýrské výpočty, které umožní určit nutné technologické parametry pro návrhové a simulační výpočty procesů a zařízení. Tento software také slouží jako podpůrný nástroj pro další výzkum a vývoj, dále pro prezentaci výsledku na profesionální úrovni a v neposlední řadě umožňuje rychlou odezvu a uplatnění výsledku pro projekční a konstrukční praxi.

Uživatelské rozhraní je tvořeno kreslicím plátnem pro vytváření modelu a interaktivním editorem pro nastavení okrajových podmínek výpočtu. Základem jsou jednotkové operace. Vhodným uspořádáním a propojením těchto jednotkových operací se modelují jednotlivé aparáty. Technologická linka je tedy vytvářena vkládáním a propojováním bilančních uzlů, které modelují buď jednotkovou operaci, aparát nebo tepelný stroj. Výpočet linky vytvořené tímto způsobem se provádí sekvenčně (tzn. ze známých vstupních proudů se vypočítají výstupní proudy daného uzlu, které jsou zároveň vstupními proudy následujícího uzlu).[16]

Rozšíření aplikace W2E o bloky (sušička a kalandr) by mohlo být provedeno dle matematických modelů zpracovaných v kapitolách 5 a 6. Dále by program mohl být rozšířen o proudy, jedním z proudů by měl být soubor prádla, který je popsán v následující kapitole.

### 8.2 Analýza a návrh knihovny „Prádlo“

Tato kapitola se zabývá analýzou a návrhem knihovny, jež by měla být použita v aplikaci „Waste-to-energy“ k popisu proudu prádla. Struktura knihovny by měla být závislá na struktuře zbývajících částí aplikace a styl programování by se tedy měl přizpůsobit. V dnešní době se již používají převážně dva programovací styly, poněkud zastaralý modulární styl programování a novější objektově orientovaný programovací styl. Při vytváření návrhu bylo předpokládáno, že ostatní části aplikace jsou naprogramovány v českém jazyce a tudíž názvy entit (objektů), jejich atributů (vlastností) a případně hodnot atributů jsou uvedeny v českém jazyce bez diakritiky. V případě, že je zdrojový kód napsán v jazyce anglickém, je nutné názvy přeložit. Aby měl programátor možnost volby mezi preferovaným stylem, jsou analýza i návrh knihovny v této kapitole vytvořeny modulárně i objektově. V podkapitole 9.2.2. je také znázorněn návrh knihovny graficky.

### 8.2.1 Analýza knihovny

Knihovna bude sloužit k definici jednotlivých typů prádla a výpočtu veličin týkajících se souboru prádla, jako jsou např. gramáž prádla, hmotnost složky, počet kusů složky a diskretní podíl složky. Pro definování typu prádla bude sloužit datová struktura (modulární styl programování, dále jen MP) nebo třída (objektově orientovaný styl programování, dále jen OOP). Nazveme tuto entitu např. "Pradlo". Tato entita bude obsahovat všechny důležité informace určující typ prádla (viz 8.1.a) a bude nutné pro ni vytvořit funkci (nebo metodu v případě OOP) pro výpočet gramáže typu prádla. Další entita nazvaná "SouborPradla" bude v knihovně představovat soubor prádla. Soubor prádla se ve skutečnosti skládá z jednotlivých složek prádla a proto budeme muset v knihovně zavést třetí entitu "SlozkaPradla". S entitou "SouborPradla" budou pracovat funkce pro výpočet celkové hmotnosti složky prádla, počtu kusů složky a diskretního podílu složky. V případě OOP se místo těchto funkcí vytvoří ekvivalentní metody entity.

### 8.2.2 Návrh knihovny

Entita "Pradlo" bude obsahovat atributy uvedené v tab. 8.1.a. V tab. 8.1.b jsou uvedeny také metody této entity (nebo funkce pracující s touto entitou). Podobně je v tab. 8.2 vytvořen návrh entity "SouborPradla" a v tab. 8.3 návrh entity "SlozkaPradla".

ATRIBUTY			
Název atributu	Typ atributu	Popis atributu	Poznámka
id		Identifikátor instance entity	Typ atributu je závislý na architektuře aplikace
nazev	textový řetězec	Název složky prádla, např. ubrus, prostěradlo, atd.	
typ	výčtový typ	Výčtový typ obsahující dva prvky a to "rovne" nebo "tvarove"	
do_sucha	booleovský typ	Informace, zda se má sušit do sucha	
hmotnost	reálné číslo	Hmotnost jednoho kusu prádla v kg	
sirka	reálné číslo	Šířka jednoho kusu prádla v mm	
delka	reálné číslo	Délka jednoho kusu prádla v mm	
vrstev	celé číslo	Počet vrstev jednoho kusu prádla	
gramaz	reálné číslo	Gramáž prádla	Pokud bude mít pradlo typ "rovne", bude se tento atribut vypočítávat metodou <code>zjisti_gramaz</code>
material	výčtový typ	Výčtový typ obsahující informaci o materiálu prádla	Seznam materiálu se ještě upřesní

Tab.8.1.a - Návrh entity "Pradlo":

<b>METODY</b>			
<i>Název metody</i>	<i>Vstup</i>	<i>Očekávaný výstup</i>	<i>Popis metody</i>
zjistí_gramaz	OOP: žádný / MP: viz popis	Reálné číslo	Pokud je atribut "typ" nastaven na hodnotu "rovne", tak se z atributů "sirka", "delka", "hmotnost" a "vrstev" vypočítá podle vzorce 3.5 gramů prádla a tato hodnota se uloží do atributu "gramaz" a zároveň se použije jako návratová hodnota metody / funkce

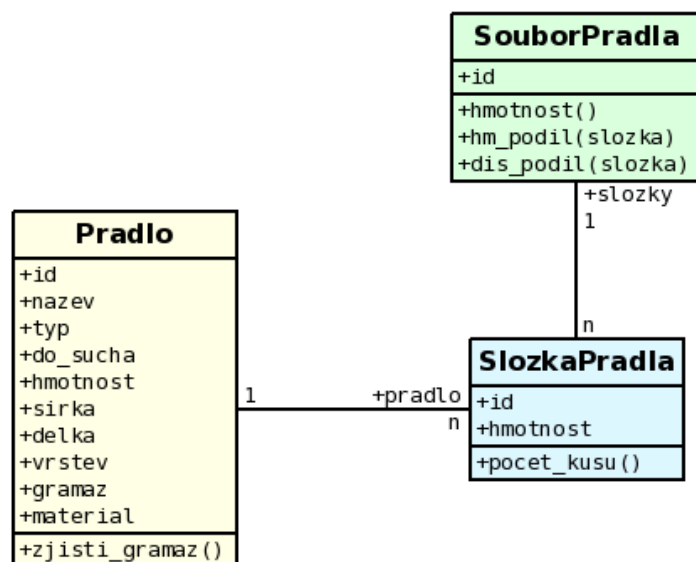
Tab. 8.1.b - Metody / funkce

<b>ATRIBUTY</b>			
<i>Název atributu</i>	<i>Typ atributu</i>	<i>Popis atributu</i>	<i>Poznámka</i>
id		Identifikátor instance entity	Typ atributu je závislý na architektuře aplikace
hmotnost	reálné číslo	Hmotnost složky prádla v kg	
pradlo		Odkaz na entitu "Pradlo", určující jaké pradlo je ve složce obsaženo	Typ atributu je závislý na architektuře aplikace
<b>METODY</b>			
<i>Název metody</i>	<i>Vstup</i>	<i>Očekávaný výstup</i>	<i>Popis metody</i>
pocet_kusu	OOP: žádný / MP: viz popis	Celé číslo	Z atributu "hmotnost" entity "SlozkaPradla" a atributu "hmotnost" příslušející entity "Pradlo" se vypočte počet kusů prádla ve složce

Tab. 8.2 – Návrh entity "SlozkaPradla":

<b>ATRIBUTY</b>			
<i>Název atributu</i>	<i>Typ atributu</i>	<i>Popis atributu</i>	<i>Poznámka</i>
id		Identifikátor instance entity	Typ atributu je závislý na architektuře aplikace
slozky	seznam / pole	Seznam odkazů na instance entity "SlozkaPradla"	
<b>METODY</b>			
<i>Název metody</i>	<i>Vstup</i>	<i>Očekávaný výstup</i>	<i>Popis metody</i>
hmotnost	OOP: žádný / MP: viz popis	Reálné číslo	Ze složek souboru prádla (entit "SlozkaPradla") se vypočítá celková hmotnost prádla
hm_podil	OOP: id entity SlozkaPradla / MP: viz popis	Reálné číslo	Z hodnoty metody / funkce "hmotnost" entity "SouborPradla" a atributu "hmotnost" entity
dis_podil	OOP: id entity SlozkaPradla / MP: viz popis	Reálné číslo	Z atributu hmotnost entity "Pradlo" a hodnoty metody / funkce "hm_podil" se vypočítá diskrétní podíl vybrané složky v souboru prádla

Tab. 8.3 – Návrh entity "SouborPradla":



Obr. 8.1 – Grafický návrh knihovny

## 9. e!Sankey 2.x pro

Schematické obrázky a diagramy, které se v této práci nachází byly vytvořeny v prostředí programu e!Sankey 2.0.3.2098 pro.

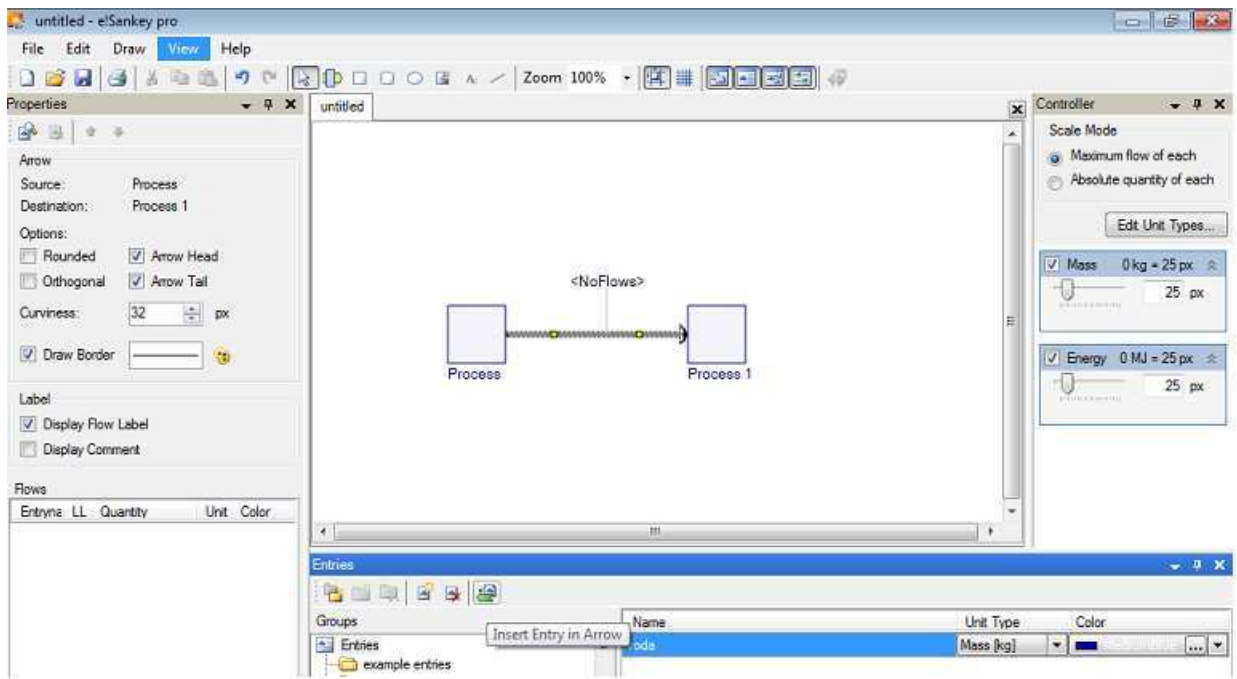
Program e!Sankey byl vyvinut za účelem tvorby Sankeyho diagramů a tzv. flow (tokových) diagramů. Uživatelské rozhraní a možnosti programu jsou tedy přizpůsobeny k tomuto účelu. Základní formát souborů programu e!Sankey je vektorový s možností exportu do rastrového formátu, což umožňuje vytvořit diagramy s vysokým rozlišením.

Po spuštění programu se nabídne možnost výběru skupiny měřících jednotek. Poté je možno začít s tvorbou diagramu následujícím způsobem (obr. 9.1). V horní části uživatelského rozhraní aplikace je k dispozici panel nástrojů. Zde je nutné vybrat tlačítko „Process“, za pomoci kterého se vytvoří jednotlivé uzly na pracovní ploše aplikace. Tyto procesy jsou základním stavebním prvkem diagramů. U procesů lze nastavit základní parametry, jako jsou například název procesu, barva a tloušťka čáry ohraničení. Proces je také možné nahradit obrázkem. Za pomoci ikony „Edit Mode“ se jednotlivé procesy spojí jednoduše kliknutím na Process1 a potažením myši na Process2. Vznikne tzv. „Flow“, ovšem aby byl vzniklý proud funkční je zapotřebí v panelu nastavení „Entries“ vytvořit a definovat vstup za pomoci „Add Entrie“ (pojmenování proudu, nastavení barvy a měřící jednotky). Aby byl vstup přiřazen vytvořenému proudu je zapotřebí tento proud označit. Poté stačí kliknout na definovaný vstup a za pomoci tlačítka „Insert Entry in Arrow“ v panelu „Entrie“ se nadefinované vlastnosti přiřadí k danému proudu. Existuje možnost přiřazení více druhů nadefinovaných vlastností, je zde ale podmínka, že typ měřící jednotky musí být stejný.

Každý „Flow“ který spojuje jednotlivé procesy má svůj vlastní panel nastavení „Properties“. Zde je možné nastavovat vzhled šipek jednotlivých proudů, tloušťky a barvy čar, a nachází se zde i vstupní pole „Quantity“.

Aplikace nabízí propojení s programem Microsoft Excel na základě tzv. „LiveLinků“. „LiveLink“ je možné vytvořit jednoduchým způsobem. Stačí zkopírovat požadovanou hodnotu z buňky v Excelu za pomoci klávesové zkratky Ctrl+C, poté ji vložit příkazem Ctrl+V do programu e!Sankey do vstupního pole „Quantity“. Při každé změně hodnoty v Excelové tabulce se změní i hodnota v aplikaci e!Sankey. Možností jak „LiveLinky“ aktualizovat je několik. Buď se při otevření již vytvořeného diagramu objeví výzva k aktualizaci, nebo při práci s diagramem je přímo v panelu nástrojů ikona „Update LiveLinks“, za pomoci které se aktualizuje celý diagram.

Program jako takový má ovšem mnoho nedostatků. V uživatelském rozhraní chybí mnoho ovládacích prvků, které by práci s diagramy zjednodušily a tím pádem také nesmírně urychlily.



Obr. 9.1 – pracovní plocha programu e!Sankey

## 10. Závěr

První část této práce seznamuje čtenáře podrobněji s procesem profesní údržby prádla. Popisuje technologie a procesy se kterými je možné se setkat v profesní prádelně. Objasňuje základní pojmy sušení a kalandrování, mezi které patří například odpařovací kapacita, takt sušičky, gramáž prádla, rychlost posuvu nebo také doba kalandrování. Blíže popisuje i možnosti úspor energií jednotlivých procesů.

V rámci práce byli vytvořeny bilanční matematické modely dvou aparátů, a to bubnové sušičky s parním ohřevem a kalandru. Další část práce podrobně popisuje jednotlivé modely, funkčnost kterých je ověřena na základě experimentálních dat. Z hlediska úspor energií počítá matematický model sušičky se systémem recirkulace a rekuperace použitého sušicího vzduchu. Systém umožňuje propočty různých nastavení děličů, čímž je možno zjistit největší teoretickou úsporu energií. Model kalandru umožňuje zjistit množství tepelných ztrát při různém využití plochy kalandru. Což se dá v praxi využít při organizaci práce a obsluhy kalandru. Oba matematické modely jsou navrhnuty tak, aby je bylo možno použít při ověřování dat naměřených v reálných provozech.

V práci byl také vytvořen návrh knihovny, jež by mohla zjednodušit programátorům aplikace Waste-to-Energy zakomponování objektů sušičky a kalandru a proudu prádla.

Z důvodu grafické prezentace výsledků hmotnostní a energetické bilance jak samotné sušičky a kalandru, tak celkové prádelny, bylo zapotřebí naučit se pracovat s aplikací e!Sankey.

## 11. Seznam použité literatury

- [1] BOBÁK, P.: *Systém pro hodnocení energetické náročnosti procesu profesní údržby prádla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 47 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.
- [2] TŮMA, Z.: *Model moderní komerční prádelny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.
- [3] KŠENZULIAK, V.: *Systém pro výpočet stěžejních parametrů u energeticky náročného spotřebitele*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 62 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Pavlas.
- [4] PAVLAS, M.,; KŠENZULIAK, V.: *Optimalizace využití tepla a vody na profesní prádelně, I. etapa*. Technická zpráva. Brno: Ústav procesního a ekologického inženýrství FSI VUT v Brně, 2006
- [5] PAVLAS, M.,; KŠENZULIAK, V.: *Optimalizace využití tepla a vody na profesní prádelně, II. etapa*. Technická zpráva. Brno: Ústav procesního a ekologického inženýrství FSI VUT v Brně, 2006
- [6] TŮMA, Z., PAVLAS, M., KŠENZULIAK, V.: *Model energeticky náročného procesu v rámci projektu NETME; předběžná technická specifikace*. Ústav procesního a ekologického inženýrství, FSI VUT v Brně, Brno 2009
- [7] Pračky nové generace chrání prádlo i zdraví [online]. Poslední úprava: 8.4.2010. [cit. 26.4.2010]. Dostupné z <<http://tn.nova.cz/magazin/hobby/byt/pracky-nove-generace-chrani-pradlo-i-zdravi.html>>
- Chytré pračky šetří energii i prostor a zároveň fandí designu [online]. Poslední úprava: 11.2.2010. [cit. 26.4.2010]. Dostupné z <<http://www.novinky.cz/bydleni/tipy-a-trendy/191610-chytre-pracky-setri-energii-i-prostor-a-zaroven-fandi-designu.html>>
- [8] Webové stránky společnosti Procter & Gamble [online]. [cit. 6.5.2010]. Dostupné z <<http://pgprof.info/>>
- [9] Webové stránky společnosti Can Loy Electrical Engineering Sdn Bhd [online]. [cit. 8.5.2010]. Dostupné z <<http://www.chanloy.com.my/>>



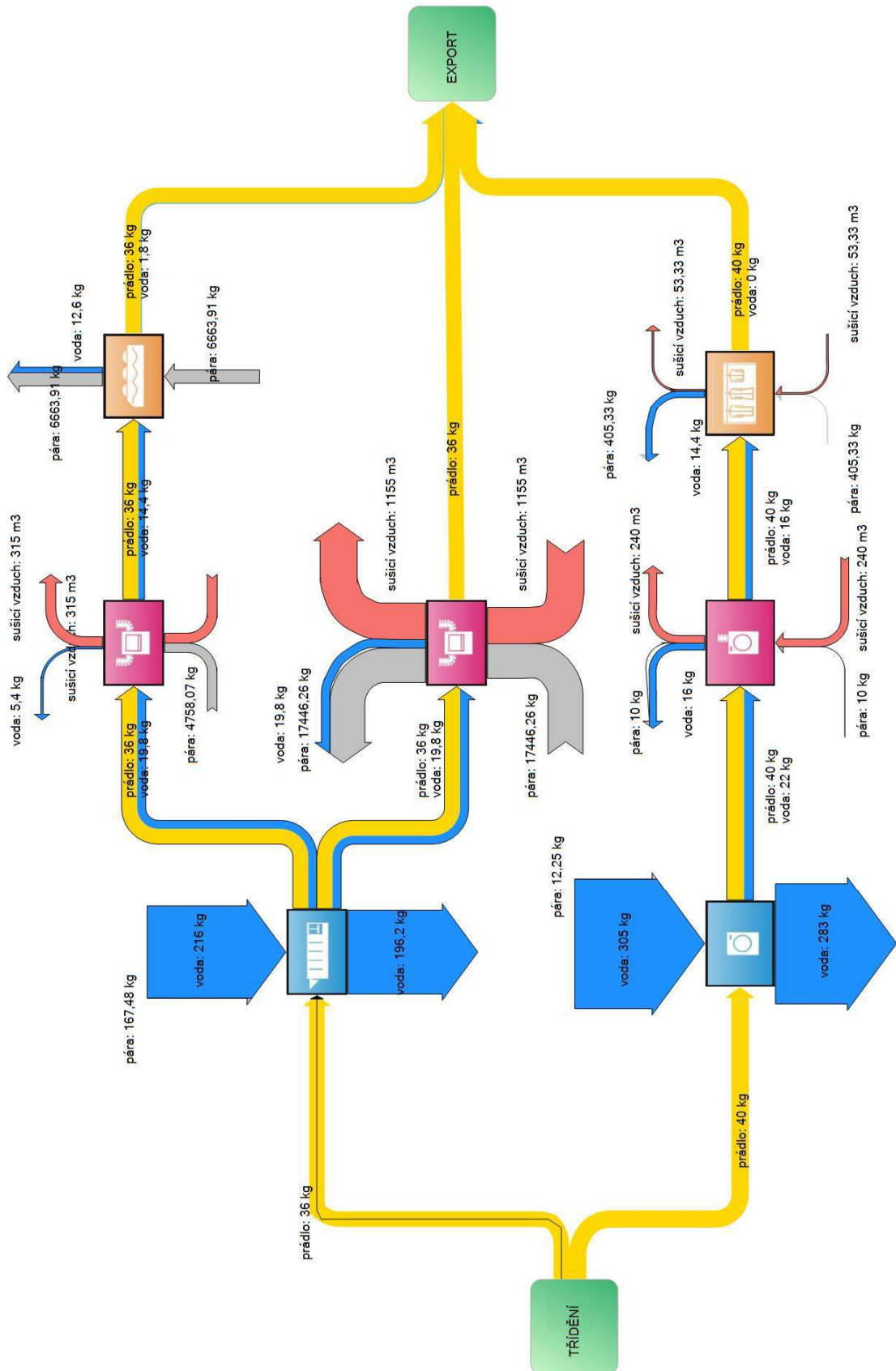
- [10] Úspory vody a energie na prádelnách podle fyzikálních, nikoliv marketingových zákonů 3. část. [online]. [cit. 7.5.2010]. Dostupné z:  
<[http://www.pgprof.info/dokumenty/publikace/setreni\\_susicky.pdf](http://www.pgprof.info/dokumenty/publikace/setreni_susicky.pdf)>
- [11] Webové stránky společnosti Laundry Quip [online]. [cit. 12.5.2010]. Dostupné z  
<<http://www.laundryquip.co.uk>>
- [12] Webové stránky společnosti ART Steam and Press [online]. [cit. 13.5.2010]. Dostupné z  
< <http://www.art-steam.com/index.htm>>
- [13] BABINEC, F.: *Aplikovaná fyzikální chemie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1991. 200 s. ISBN 80-214-0367-5
- [14] PERRY, R. H.; GREEN, D. W.: *Perry`s Chemical Engineers` Handbook*. 8<sup>st</sup> ed. New York: McGraw – Hill, 2007. 2640 p. ISBN 0-07-142294-3
- [15] Výzkumný záměr MSM0021630502 – Ekologicky a energeticky řízené soustavy zpracování odpadů a biomasy (2005-2011, MSM). [online], [cit. 7.5.2010], dostupné z:  
<http://www.isvav.cz/researchPlanDetail.do?rowId=MSM0021630502>
- [16] PAVLAS, M.: *Systém pro výpočet technologických parametrů procesů včetně energetických aspektů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 109 s. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.

## 12. Seznam příloh

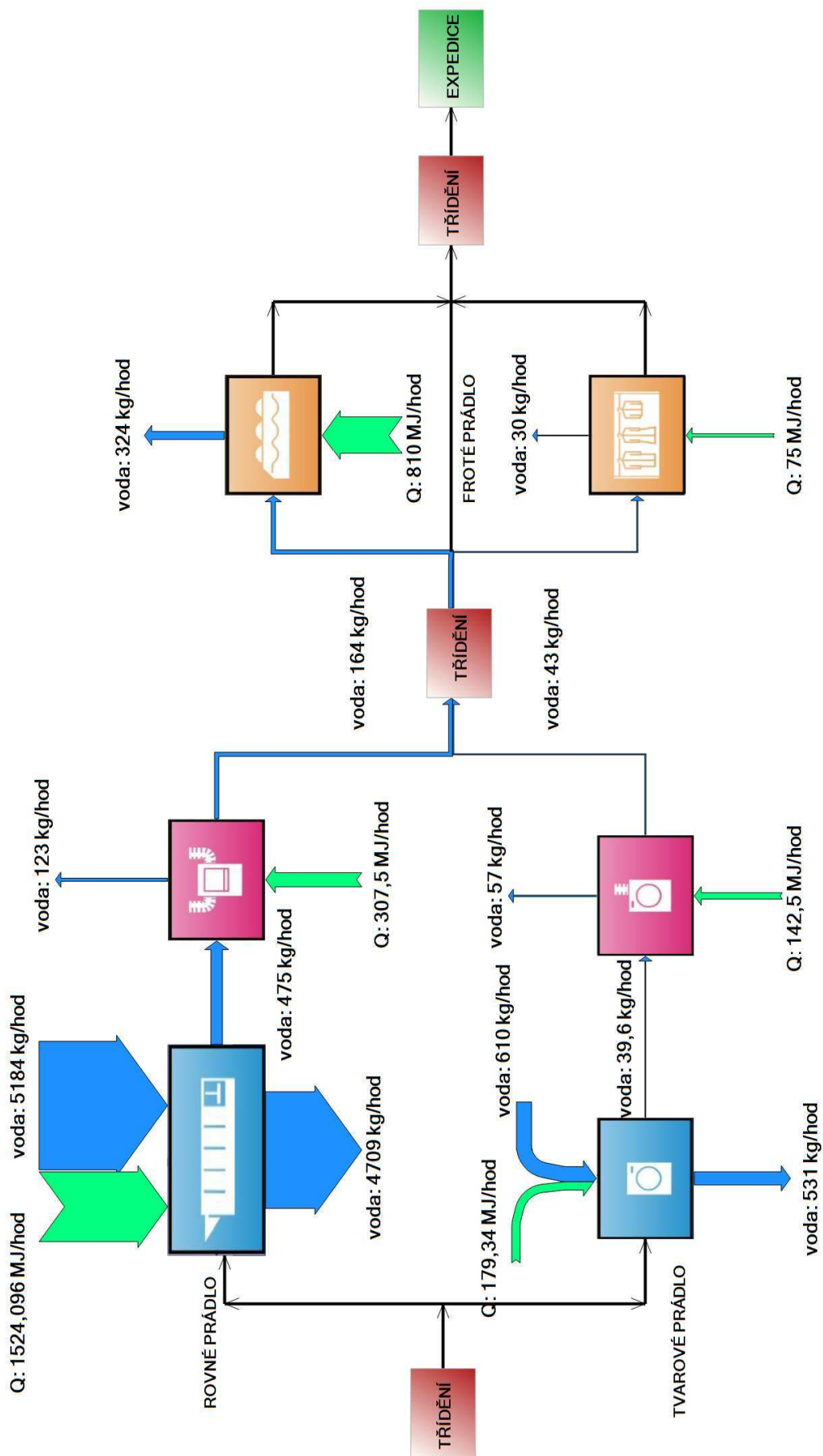
- [P1] Ukázky Sankeyho diagramů hmotnostní a energetické bilance prádelny.
- [P2] Matematický model.xls.
- [P3] Ukázky hmotnostní a energetické bilance sušičky.
- [P4] Sankeyho diagramy pro hmotnostní bilanci kalandru pro jednotlivé typy prádla.
- [P5] Výpočet tepelných ztrát.mw
- [P6] Iterace pro kalandr.mw
- [P7] Iterace pro kalandr pro reálné využití plochy.mw



Diagram zobrazení průběhu jedné dávky prádla prádelnou a spotřeba vody, páry a vzduchu u jednotlivých zařízení.

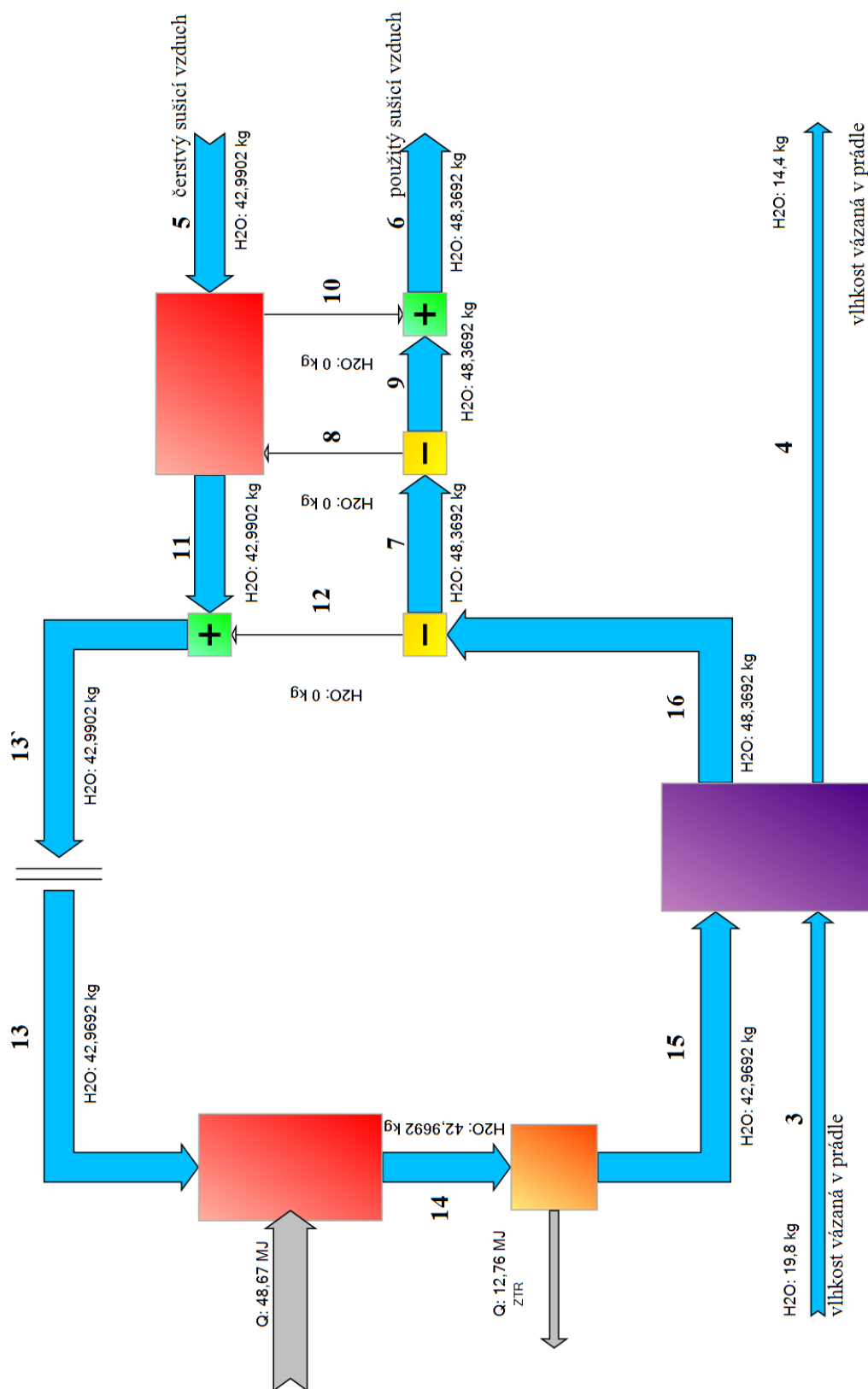


Ideální stav, kdy všechny zařízení pracují kontinuálně.



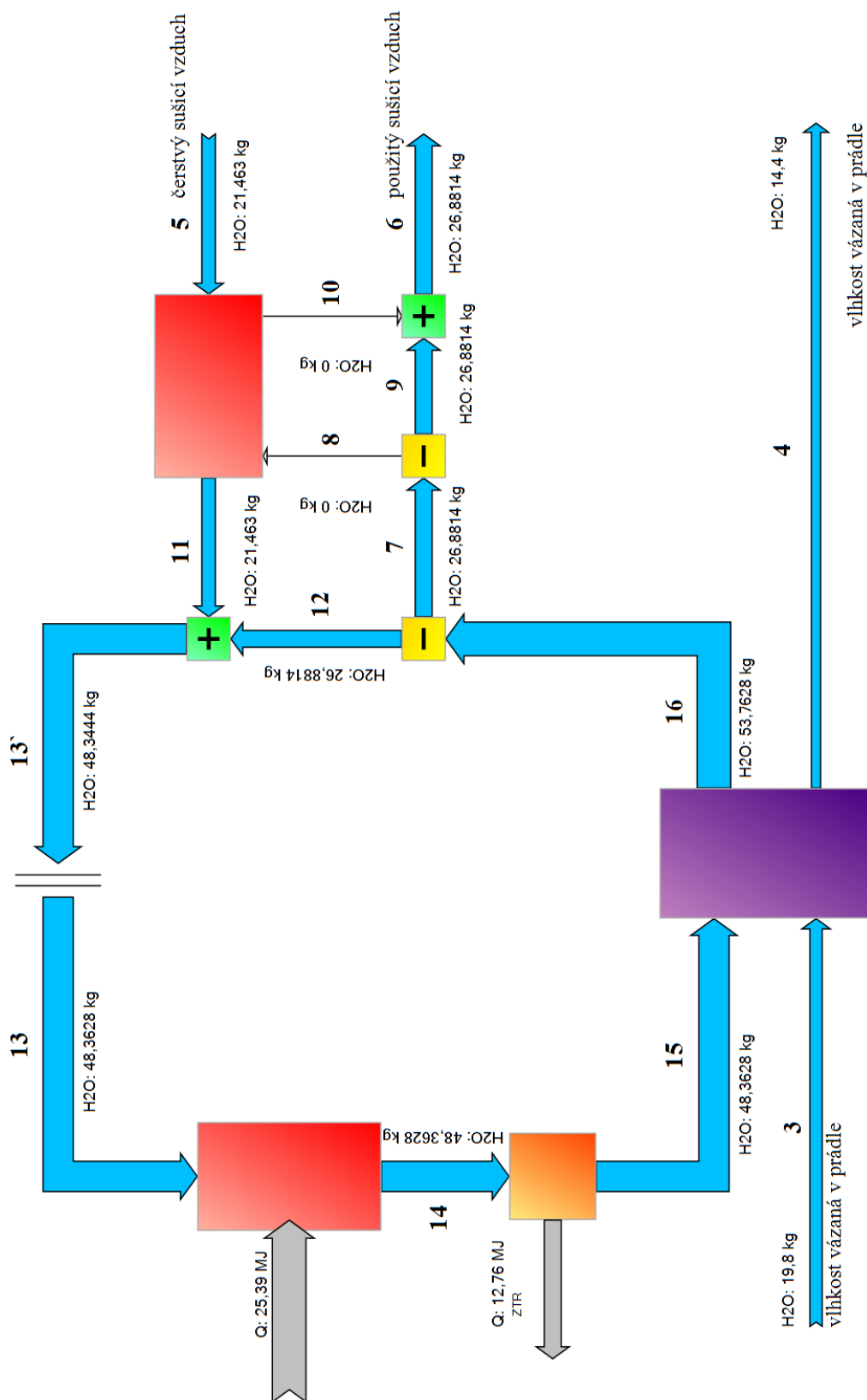
**Příloha P3**—Vodní a energetická bilance sušičky, při sušení z 55% vlhkosti na 40% vlhkost.

Dělič 1 nastaven na 0 %, dělič 2 nastaven na 0 %.



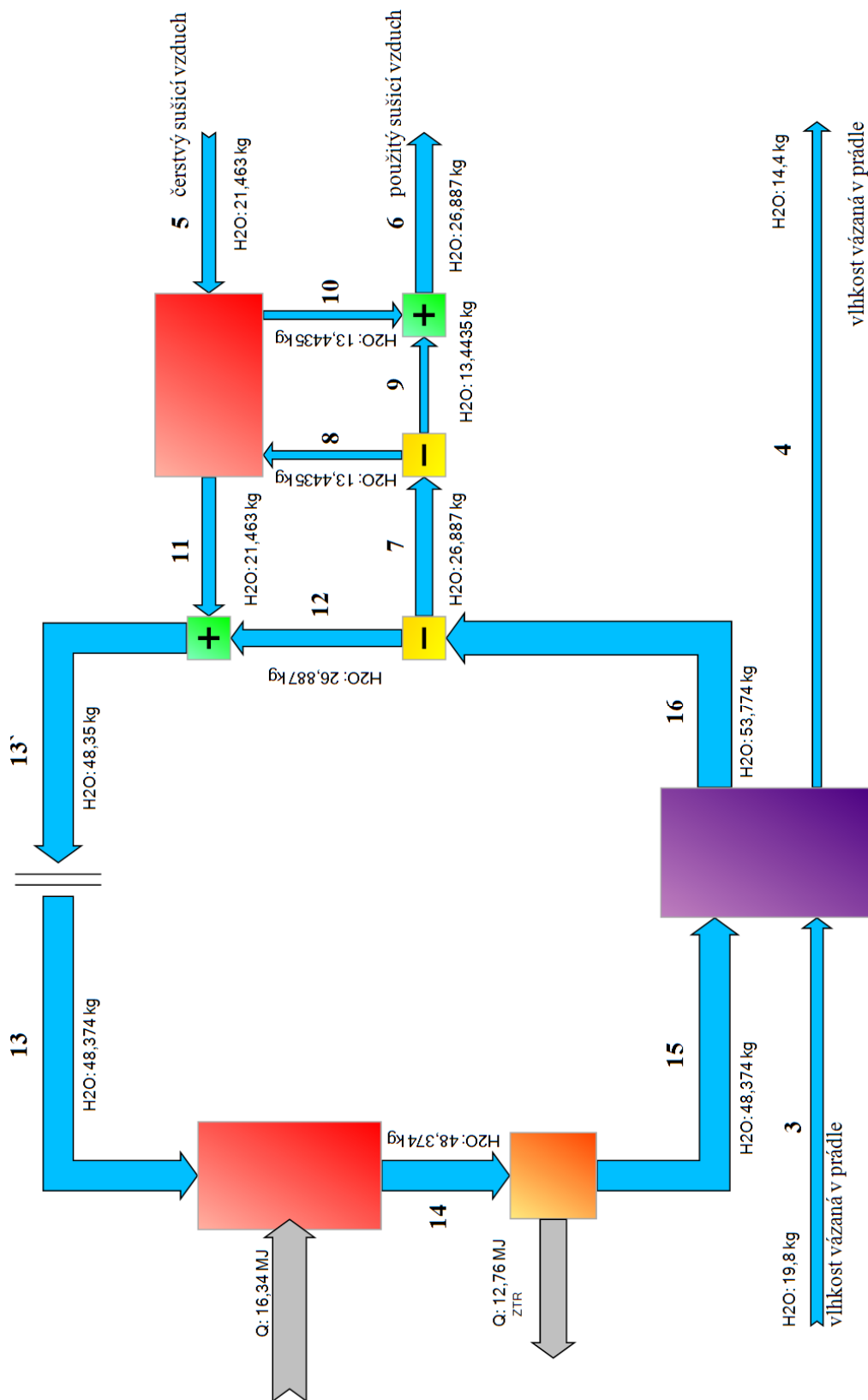
Vodní a energetická bilance sušičky, při sušení z 55% vlhkosti na 40% vlhkost.

Dělič 1 nastaven na 50 %, dělič 2 nastaven na 0 %.



Vodní a energetická bilance sušičky, při sušení z 55% vlhkosti na 40% vlhkost.

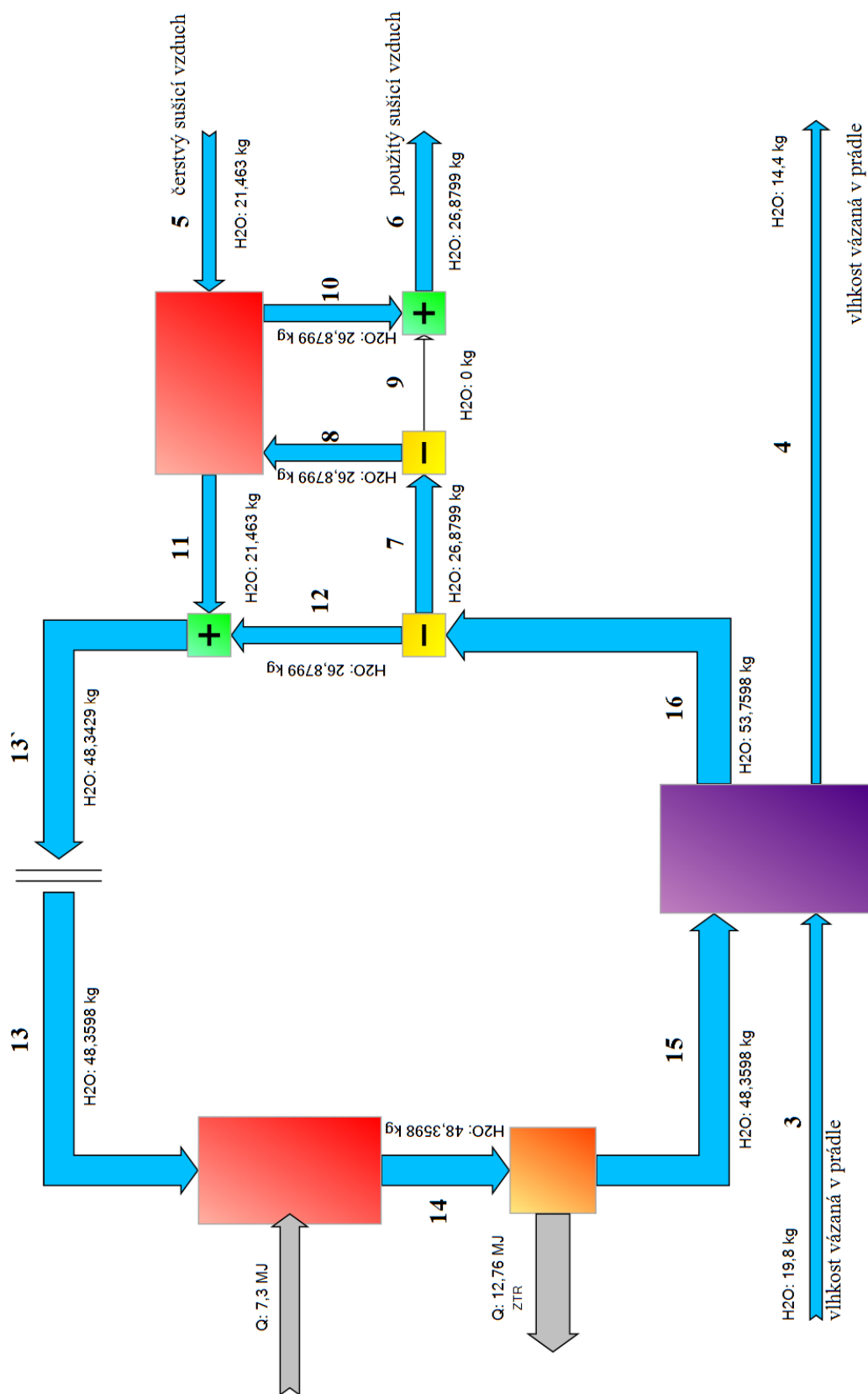
Dělič 1 nastaven na 50 %, dělič 2 nastaven na 50 %.



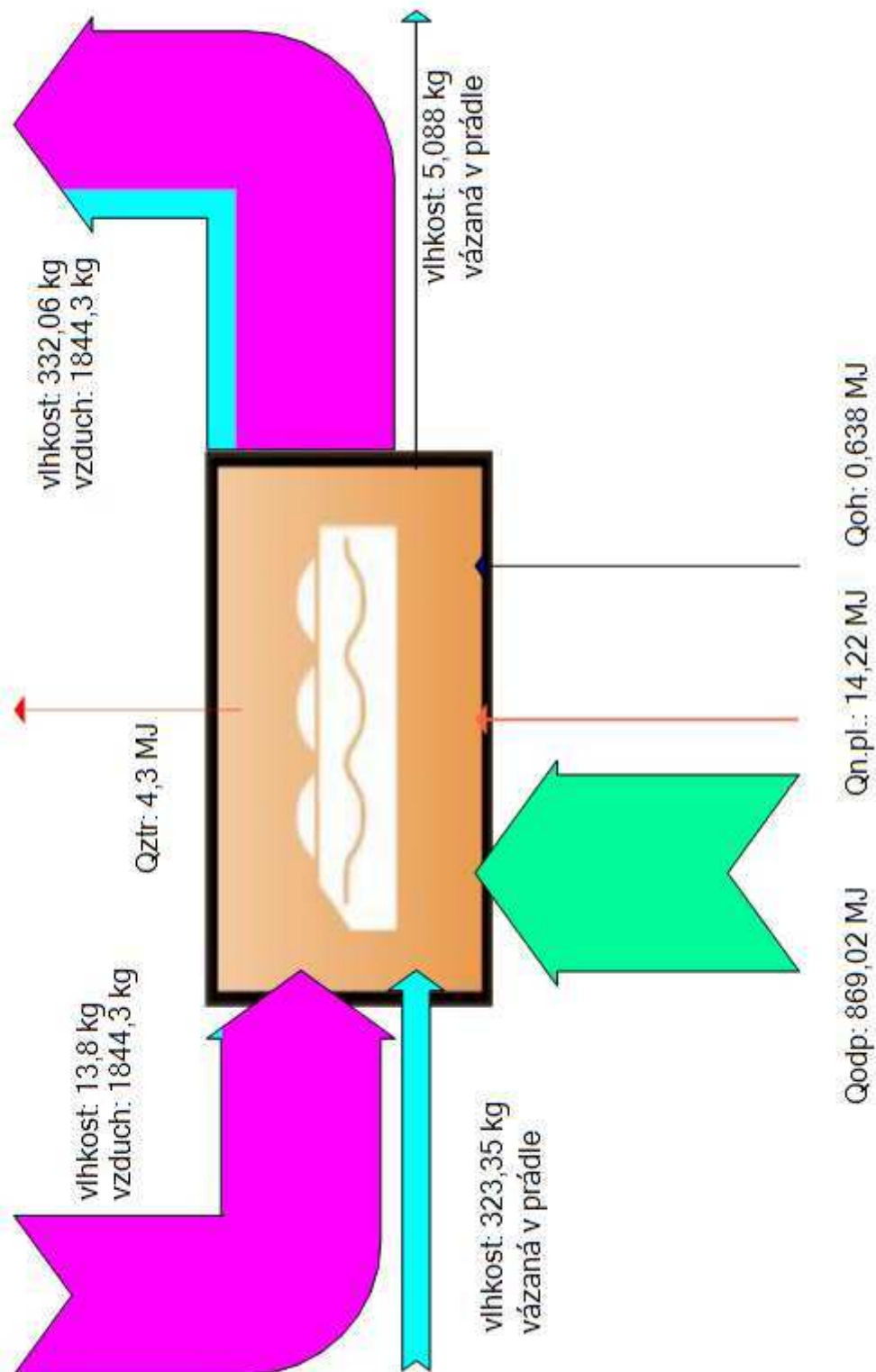


Vodní a energetická bilance sušičky, při sušení z 55% vlhkosti na 40% vlhkost.

Dělič 1 nastaven na 50 %, dělič 2 nastaven na 100 %



**Příloha P4** – hmotnostní a energetická bilance kalandru při 83,92% využití plochy kalandru.



Hmotnostní a energetická bilance kalandru při 69,93% využití plochy kalandru.

