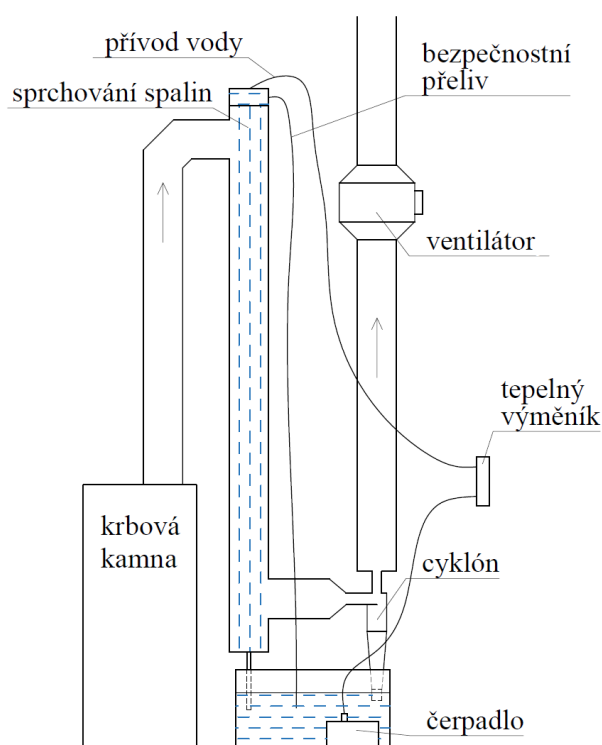


Mokrý odlučovač jemných částic

(funkční vzorek číslo 176564)

Cílem projektu je návrh zařízení pro separaci částic z proudu spalin, vzniklých spalováním biomasy. Separace je zde dosaženo součinností vodní sprchy a malého cyklónu. Zjednodušené schéma je znázorněno na Obrázku 1. Sprcha zajišťuje zchlazení spalin a zvýšení jejich relativní vlhkosti tak, aby docházelo ke kondenzaci vodní páry na přítomných částicích. Takto zvětšené částice jsou poté v cyklónu snadněji odlučitelné. Mimoto však sprcha odlučuje částice i samotným kontaktem a účinnost separace je tak ještě zvýšena. Přívod vody zajišťuje čerpadlo ponořené do zásobníku s vodou. Zobrazený deskový tepelný výměník byl připraven pro případné chlazení sprchovací vody. Tlakovou ztrátu cyklónu pokrývá ventilátor.



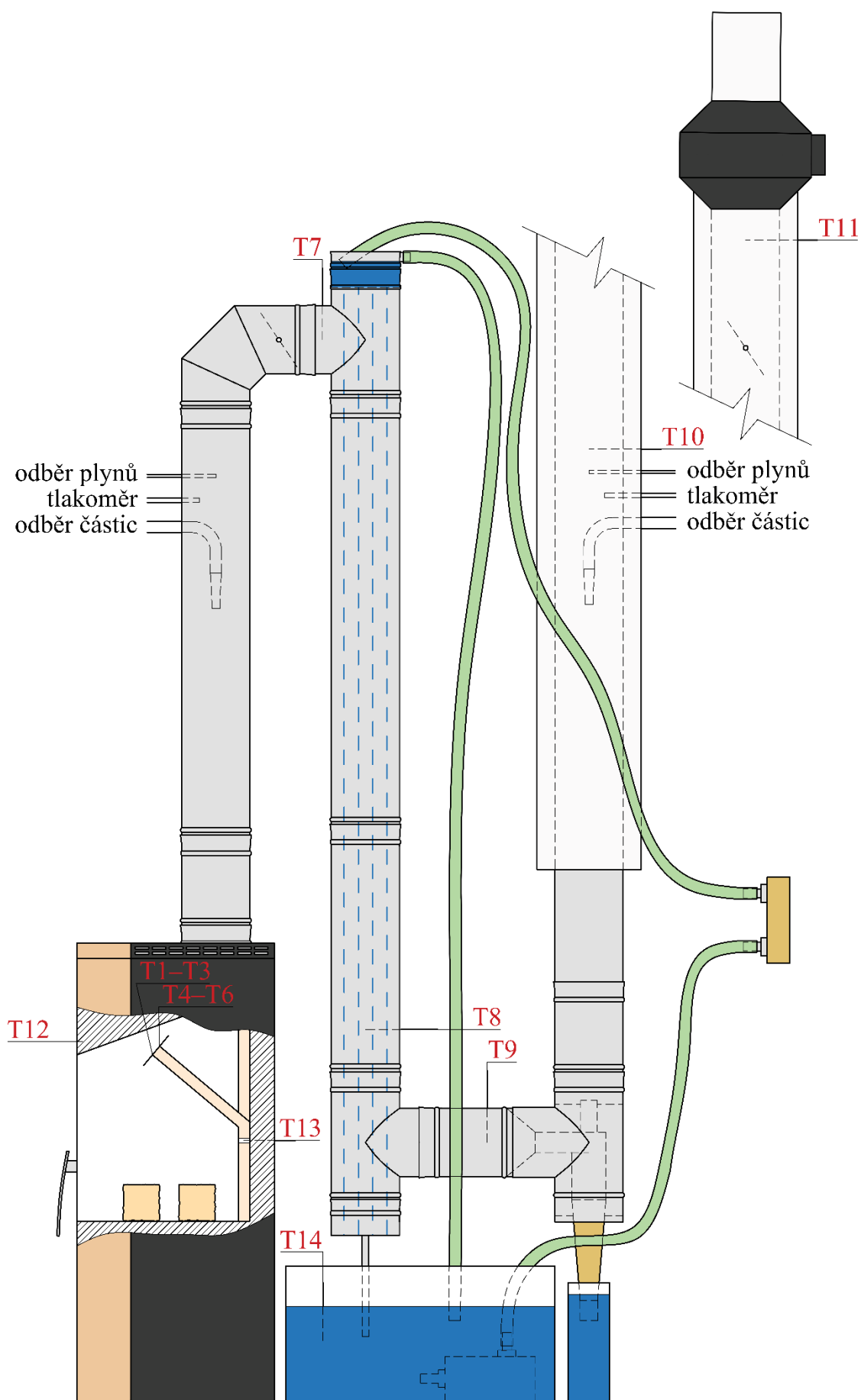
Obrázek 1. Zjednodušené schéma odlučovacího zařízení.

Jako spalovací zařízení byla zvolena krbová kamna ABX Grönland s ručním přikládáním o přímém tepelném výkonu 6 kW. Cirkulace vody je zajištěna čerpadlem Eheim 3400. Jeho výhodou je vysoký průtok, nicméně pro naši výtlačnou výšku (2,5 m) se ukázalo, že průtok 8 l/min je zbytečně vysoký, takže bylo do oběhu zařazeno uzavírací šoupě a průtok seškrcen na požadovanou hodnotu. Navíc byla horní miska s vodou opatřena přepladem, kterým přebytečná voda stékala zpátky do zásobníku, čímž byla zajištěna stále stejná výška hladiny v misce. Při provozu však byl průtok této vody minimální. Cyklón byl vyroben z 0,5 mm tlustého mosazného plechu. Předpokládaná tlaková ztráta cyklónu byla asi 250 Pa, čemuž byl přizpůsoben i výběr odtahového ventilátoru. Přívod spalin do cyklónu je řešen tangenciálním vstupem obdélníkového průřezu o rozměrech 31×47 mm, jemuž přecházel jehlanovitý přechod ze 150mm průřezu spalinovodu. Předpokládaná rychlost na vstupu je pak okolo $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Celý cyklón byl vložen do standardního komínového T-kusu pro utěsnění a snadnou výměnu. Pro pokrytí tlakových ztrát

byl využit radiální potrubní ventilátor Dalap TURBINE M. Z důvodu vyšší očekávané tlakové ztráty na cyklónu byl zakoupen ventilátor o průměru 250 mm (vyšší dosažitelný statický tlak) s redukcí na požadovaných 150 mm. Pro regulaci otáček byl zařazen tyristorový regulátor, umožňující plynulou regulaci příkonu ventilátoru mezi 70 a 150 W, čemuž odpovídá podtlak za cyklónem 180 a 460 Pa.

Ověření funkčnosti zařízení

Reálné schéma zařízení na odlučování jemných částic je na Obrázku 2. Sestaveno bylo z běžně dostupných nerezových komínových vložek o průměru 150 mm a tloušťce 1 mm. Po opuštění kamen jsou spaliny nejprve vedeny vzhůru. Za kolenem je umístěna klapka k regulaci tahu kamen. Následuje T-kus, v jehož horním otvoru je umístěna miska na kondenzát s vyvrtanými otvory, kterými protéká přiváděná voda a vytváří tak proud kapek v celé svislé části. Díky tomu jsou spaliny výrazně zchlazeny a jejich relativní vlhkost je zvýšena. Přebytečná (neodpařená) voda je odváděna zpátky do zásobníku. Studené a vlhké spaliny pokračují do cyklónu, v nichž dochází k dalšímu odloučení částic odstředivou silou. Dále již spaliny odchází izolovaným komínem přes další klapku a ventilátor přímo od ovzduší.



Obrázek 2. Podrobné schéma odlučovacího zařízení a měřicí tratě.

Zařízení bylo osázeno celkem 14 termočlánky typu K. První tři termočlánky T1–T3 jsou umístěny přímo v ohništi v jedné řadě vedle sebe, jejich průměrem lze tedy získat přibližnou teplotu spalin při opouštění ohniště. Články T4–T6 jsou jen kousek za předchozími. T7 je těsně před sprchou a označuje tak teplotu spalin při prvním kontaktu se sprchovací vodou a také přibližnou teplotu odběru před separátorem. T8 je přímo v proudu kapek a je tedy značně ovlivňován teplotou chladicí vody, T9 udává teplotu spalin bez kapek na vstupu do cyklónu, T10 je teplota odběru za separátorem, T11 je teplota před ventilátorem, T12 je teplota sekundárního vzduchu, T13 teplota terciárního vzduchu a nakonec T14 teplota chladicí vody. Teploty odběrů jsou podstatné při přepočtu odebraného objemu plynu na normální podmínky.

Odběr částic byl realizován ve dvou měřicích bodech: před a za separátorem částic. Nejprve byly odebírány vzorky ke stanovení celkové koncentrace tuhých znečišťujících látek (TZL). Dle normy ČSN EN 13284-1 se spaliny vedou přes teplotně odolný filtr, na němž se částice zachytí. Vyčištěný plyn pokračuje přes chladič, v němž dojde ke kondenzaci vodní páry. Poté již následuje plynoměr a vývěva. Izokinetického odběru je dosaženo volbou odběrové sondy a také vhodným průtokem. Pro vysokou variabilitu spalovacího procesu byly vzorky v obou bodech odebírány zároveň dvěma samostatnými odběrnými sadami a lze je tedy porovnávat přímo (s přihlédnutím k obsahu kyslíku, viz níže). Jelikož se v případě kamen s ručním přikládáním koncentrace částic výrazně mění v průběhu cyklu (plápolající a doutnající fáze), byly spaliny odsávány po celou dobu cyklu, tedy 45 minut.

Kromě stanovení TZL byla zjišťována také změna velikostní distribuce hmotnostní koncentrace. K tomu posloužil vysokoteplotní kaskádový impaktor Dekati (HT-DLPI+) s měřicím rozsahem 0,014–50 μm v celkem 14 úrovních. Hliníkové fólie byly natřeny tenkou vrstvou vazelíny pro snížení odrazu částic, koncentrace se stanovují gravimetricky. Impaktor byl vyhříván na 140 °C, zachycené částice jsou tedy naprosto suché. Z důvodu vysoké koncentrace částic ve spalinách nebylo možno impaktor provozovat po celý cyklus, ale jen několik minut. Všechny odběry byly tedy provedeny přesně 5 minut po přiložení, kdy jsou koncentrace nejvyšší.

Koncentrace částic v jednotlivých místech měřicí tratě výrazně závisí na množství přísávaného (falešného) vzduchu, který je ředí. Z tohoto důvodu byly všechny spoje spalinovodu zalepeny hliníkovou páskou a případné netěsnosti zalepeny kamnářským tmelem. I přes veškerou snahu se však nepodařilo systém utěsnit dokonale. Je tedy nezbytně nutné sledovat v měřicím bodě také obsah kyslíku a výsledek přepočítávat na normovaný obsah (dle normy ČSN EN 16510-1 je to pro krbová kamna 13 %). Koncentrace plynů sledoval v obou bodech přístroj Siemens Ultramat 21, který kromě kyslíku měří také oxid uhelnatý.

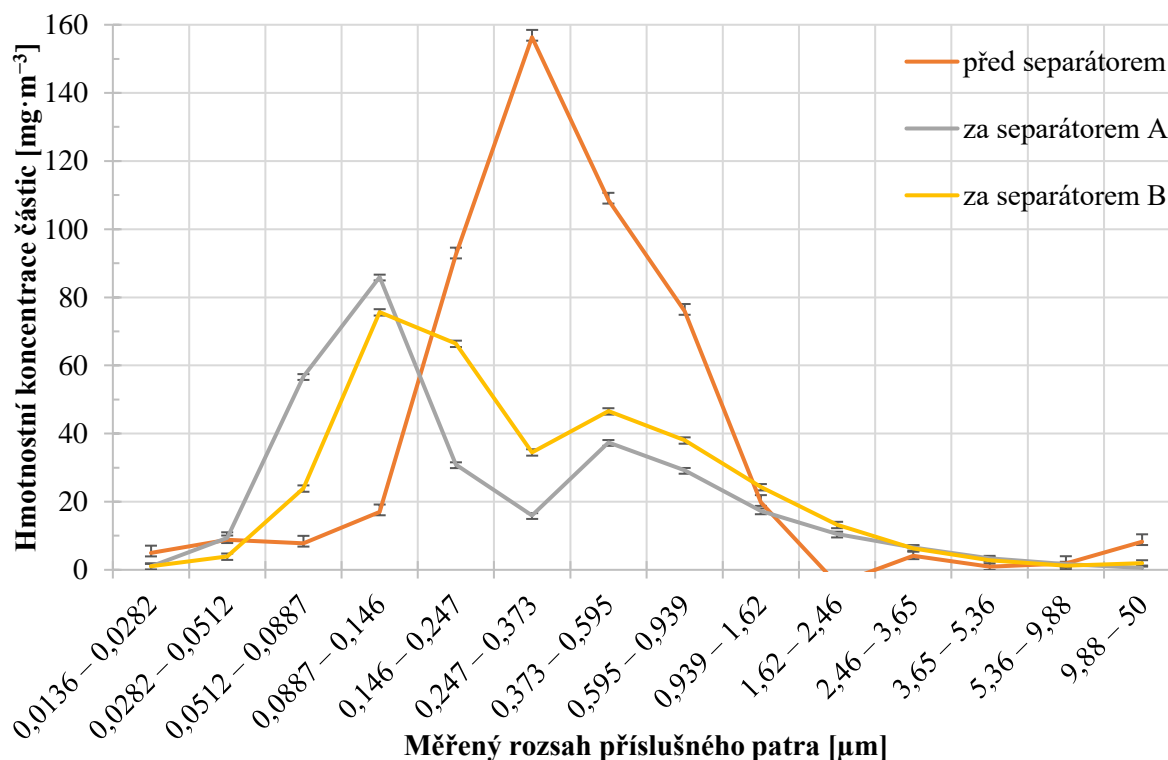
Jak již bylo zmíněno, ke stanovení TZL byly částice na filtry odebírány simultánně v obou měřicích bodech po celou dobu jednoho cyklu. Toto bylo zopakováno celkem třikrát při identických podmínkách a výsledky jsou uvedeny v Tabulce 1. Odchylka průtoku při odběru byla maximálně 12 % oproti izokinetickému. Objem odebraného plynu byl přepočítán na normální podmínky. Podíl falešného vzduchu byl prakticky stejný pro všechny tři cykly a to zhruba 0,22 na jeden díl spalin. Koncentrace za separátorem vždy výrazně poklesly, přepočet na referenční obsah kyslíku však účinnost poněkud snižuje. I přesto se účinnost separace pohybuje okolo 57 %.

Pro studium vlivu sprchy a cyklónu na hmotnostní distribuci částic byly odebrány tři sady impaktoru, jeden bez separátoru a dva za ním. Výsledkem každé z nich bylo 14 fólií se zachycenými částicemi, roztříděnými dle svého ekvivalentního aerodynamického průměru. Díky velmi malým hmotnostem částic byla brána v úvahu i přesnost vážení vah. Ta je v grafu (Obrázek 3) znázorněna chybovou úsečkou jako jedna směrodatná odchylka a pravděpodobně způsobila i zápornou hodnotu koncentrace u jednoho z pater (hmotnost fólie před měřením byla mírně vyšší, než po něm). Z hmotnostního hlediska zaujímají drtivou většinu částice PM_{10} (menší, než 1 μm v průměru). Distribuce před separátorem je monomodální s maximem okolo 300 nm, částice na nejnižších třech patrech nejsou hmotnostně příliš významné. Sprcha s cyklónem tuto distribuci mění na bimodální a hlavní vrchol přesouvají na zhruba 120 nm.

Tabulka 1. Účinnost odlučování TZL při spalování bukového dřeva.

	jednotka	1		2		3	
		před	za	před	za	před	za
navážka filtru	mg	40,3	16,6	21,7	9,2	32,9	11,4
odchylka průtoku	%	4	12	-11	-6	-4	-10
objem odebraného plynu	Nm ³	0,204	0,279	0,251	0,264	0,270	0,255
koncentrace TZL	mg·Nm ⁻³	197,6	59,5	86,6	34,8	122,1	44,7
průměrná koncentrace O ₂	%	9,84	11,82	11,91	13,51	10,24	12,13
podíl falešného vzduchu	%	21,7		21,6		21,5	
koncentrace TZL (13 % O ₂)	mg·Nm ⁻³ _{ref}	142	52	76	37	91	40
pokles koncentrace TZL	%	63		51		56	

Separátor tedy zřejmě dobře odlučuje částice nad 200 nm, ale na úkor částic nejmenších, jejichž zvýšenou koncentrací lze vysvětlit rozpadem větších aglomerátů při vysokých rychlostech v cyklónu. Výsledky z impaktoru bohužel nejsou porovnatelné s koncentracemi TZL, neboť odběry na impaktor probíhaly jen asi dvě minuty přesně pět minut po přiložení. Díky tomu jsou změřené koncentrace výrazně vyšší než ty průměrné za celý cyklus, a to 503 mg·Nm⁻³_{ref} před separátorem a 306 a 340 mg·Nm⁻³_{ref} za ním.



Obrázek 3. Vliv separátoru na hmotnostní distribuci částic.