

Optimalizace míchání suspenze PVC v zásobníku o objemu 100 m³

Bc. Vít Pešava

Vedoucí práce: Doc. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Abstrakt

Cílem této práce je navrhnout na základě experimentů a literatury takové konstrukční úpravy míchání zásobníku, které zlepší homogenizaci v celém jeho objemu. Základem pro návrh úprav bylo experimentální zjištění současného stavu na modelu stávajícího zařízení. Navržené úpravy byly experimentálně ověřovány. Z důvodu minimalizace investičních nákladů byla ověřována možnost použití stávajícího pohonu míchadla z hlediska dostatečného výkonu a navržena varianta s nižšími nároky na výkon elektromotoru

Klíčová slova

Míchání, homogenizace, zvětšování měřítka, narážky.

1. Zadání a základní informace

Návrh konstrukčních úprav míchaného zásobníku o objemu 100 m³ za účelem zlepšení homogenizace míchané suspenze při různých úrovních plnění zásobníku. Z předaných provozních záznamů je zřejmé, že výška hladiny H suspenze se při různém plnění aparátu pohybuje v rozmezí od 10 % do 70 % výšky zásobníku. Provozně nejčastější případ je plnění do výšky 30 % až 60 %. Zásobník je tvořen válcovou nádobou bez narážek s klenutým dnem i víkem. Průměr válcové části zásobníku je $D = 4000$ mm a jeho celková výška je 8870 mm (výška válcové části je 7250 mm). Geometrické parametry zásobníku jsou dány předaným výkresem zásobníku.

V současnosti se pro míchání používá etážové míchadlo (viz obr. 1) tvořené dle předané dokumentace míchadlem se třemi zakřivenými lopatkami (tzv. Pfaudler) o průměru $d_1 = 1500$ mm a s výškou lopatky 90 mm a horním dvoulopatkovým míchadlem se skloněnými lopatkami pod úhlem 45° o průměru $d_2 = 1500$ mm a výšce lopatky 200 mm. Výška spodní hrany lopatky spodního míchadla nade dnem je $H_2 = 90$ mm a vzdálenost míchadel od sebe je $H_3 = 3400$ mm. Otáčky míchadla jsou $n = 42,5$ min⁻¹ a štítkový výkon instalovaného elektromotoru je 11,8 kW. Naměřený výkon při provozním plnění zásobníku na 65 %, tj. při zaplavení obou míchadel, je 5,5 kW.

Pro experimenty potřebné pro návrh úprav míchaného zásobníku byly dodány vzorky suspenze PVC o hustotě $\rho = 1410$ kg·m⁻³.

2. Metodika řešení

Konstrukční úpravy míchaného zásobníku na suspenzi PVC byly navrženy na základě modelových experimentů probíhajících na geometricky podobném míchacím zařízení v laboratořích Ústavu procesní a zpracovatelské techniky. Přenos experimentálních dat z modelového měřítka na zařízení provozních rozměrů byla provedena na základě mnoha experimentálních zkušeností a doporučení uvedených v [1, 2 a 3].

V první fázi experimentů byla popsána homogenizace míchané vsádky při stávajícím uspořádání míchacího zařízení při třech limitních úrovních plnění zásobníku. Na základě těchto úvodních experimentů byla poté navržena konstrukční úprava míchaného zásobníku. Pro takto navrženou geometrickou konfiguraci byla experimentálně opět při třech limitních úrovních plnění ověřena homogenizace míchané vsádky a to jak standardní vodivostní metodou, tak i s reálnou suspenzí PVC. Na závěr byly stanoveny příkonové charakteristiky míchadel při jednotlivých konfiguracích míchacího zařízení a stanoven příkon na hřídeli míchadla při provozním stavu.

3. Teoretický úvod

Teoretický popis průběhu homogenizace by vyžadoval simultánní řešení Navierovy-Stokesovy a základní rovnice pro přenos hmoty. Při míchání vzájemně mísitelných kapalin je řídicím dějem zpravidla konvektivní a turbulentní difúze. Molekulární difúze v kapalinách je relativně pomalá a v míchaných systémech s dobrou cirkulací je obvykle možno její vliv zanedbat. Na základě inspekční analýzy [2] výše popsaných rovnic platí pro geometricky podobná míchací zařízení, že při konstantním stupni homogenity míchané vsádky závisí bezrozměrná doba homogenizace na modifikovaném Reynoldsově čísle používaném v teorii míchání

$$nt = f(Re). \quad (1)$$

V oblasti plouživého proudění, resp. při plně vyvinuté turbulenci přejde rov. (1) na tvar

$$nt = konst. \quad (2)$$

Při stanovení příkonu míchadla vycházíme z příkonové charakteristiky tj. ze závislosti příkonového čísla Po na Reynoldsově čísle Re

$$Po = f(Re), \quad (3)$$

kde

$$Po = \frac{P}{\rho n^3 d^5}, \quad (4)$$

V turbulentní oblasti je příkonové číslo konstantní.

Při návrhu provozního míchacího zařízení je nutné nejprve vybrat geometrické uspořádání a velikost zařízení, tj. tvar a geometrie nádoby, typ míchadla, případně vestavby v nádobě... a poté stanovit frekvenci otáčení míchadla. To se provádí zpravidla v laboratorních podmínkách s danou vsádkou na zmenšeném modelu. Takto získané výsledky je nutné převést na dílo provozní velikosti. Přitom je nutné zachovat geometrickou podobnost a při stanovení otáček vyjít z otáček stanovených na modelu pro kritický účel míchání (homogenizace, suspendace ze dna případně z hladiny). Pravidla pro modelování jsou následující:

Homogenizace

Jak vyplývá z rov. (2), je nutné mít pro zachování stejné doby homogenizace na modelu i na díle stejné otáčky.

Suspendace

Jestliže předpokládáme geometrickou podobnost a danou velikost částic, vyplývá např. z [3] vztah

$$n \approx d^{-(1+\alpha)/2}, \quad (5)$$

ze kterého při $\alpha=0,5$ dostaneme

$$n \approx d^{-0,75} \quad (6)$$

a při $\alpha=1$

$$n \approx d^{-1}. \quad (7)$$

Měrný příkon

Častým kritériem pro přenos dat z modelu na dílo je požadavek konstantního měrného příkonu

$$\varepsilon = \frac{P}{V}, \quad (8)$$

pro který z rov. (4) vyplývá úměra

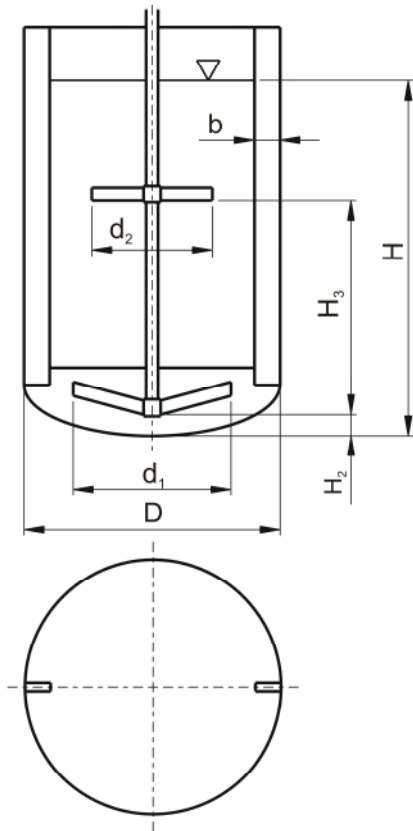
$$n \approx d^{-2/3}. \quad (9)$$

4. Popis experimentů a vyhodnocení měření

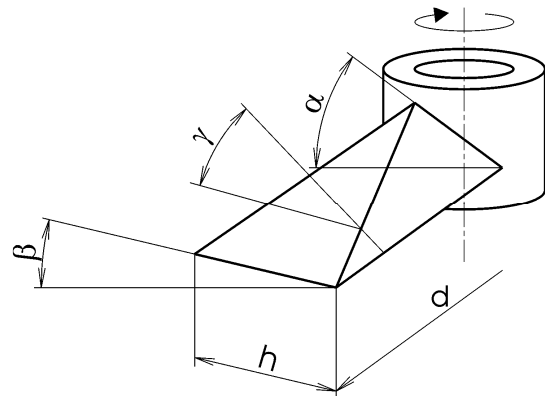
Experimenty probíhaly v geometricky podobném modelovém zařízení s průhlednou válcovou nádobou s klenutým dnem o vnitřním průměru $D = 300$ mm a etážovým míchadlem tvořeným radiálním míchadlem se třemi zakřivenými lopatkami (tzv. Pfaudler) o průměru $d_1 = 117$ mm a horním axiálním dvoulopatkovým míchadlem se skloněnými lopatkami pod úhlem 45° o průměru $d_2 = 100$ mm. Výška spodní hrany lopatky spodního míchadla nade dnem byla $H_2 = 7$ mm a vzdálenost míchadel od sebe je $H_3 = 255$ mm. Geometrická konfigurace míchaného zásobníku je znázorněna na obr. 1. Při následné optimalizaci zařízení z hlediska homogenizace míchané vsádky byla nádoba vybavena dvěma radiálními narážkami sahajícími od hladiny až k anuloidovému přechodu klenutého dna o šířce $b = 0,1D$. Z hlediska optimalizace uspořádání etážového míchadla byl sledován vliv průmětu a tvaru lopatek horního axiálního míchadla. Mimo v současnosti instalovaného dvoulopatkového míchadla se skloněnými lopatkami bylo testováno i použití hydrodynamicky optimalizovaného míchadla s rovnými lomenými lopatkami. Tvar lopatek tohoto míchadla je standardizovaný v oborové normě CVS 69 1043 a je znázorněn na obr. 2.

Homogenizace míchané vsádky byla pro všechny testované geometrické konfigurace zařízení sledována při třech limitních úrovních plnění zásobníku. Minimální hladina odpovídala minimálnímu plnění do cca 10 % výšky zásobníku, tj. výška hladiny na modelu $H = 120$ mm, kdy byla vsádka míchána pouze spodním míchadlem typu Pfaudler. Maximální výška hladiny odpovídala maximálnímu plnění do cca 70 % výšky zásobníku, tj. výška hladiny na modelu $H = 415$ mm, kdy v míchané vsádce operovalo celé etážové míchadlo. Z hlediska provozu je další kritickou úrovní plnění zásobníku stav, kdy míchání vsádky je realizováno pouze spodním míchadlem, avšak při maximální výšce hladiny. Tento stav nastává při výšce hladiny dosahující těsně pod spodní hranu lopatek horního míchadla, čemuž odpovídá výška hladiny na modelu $H = 250$ mm.

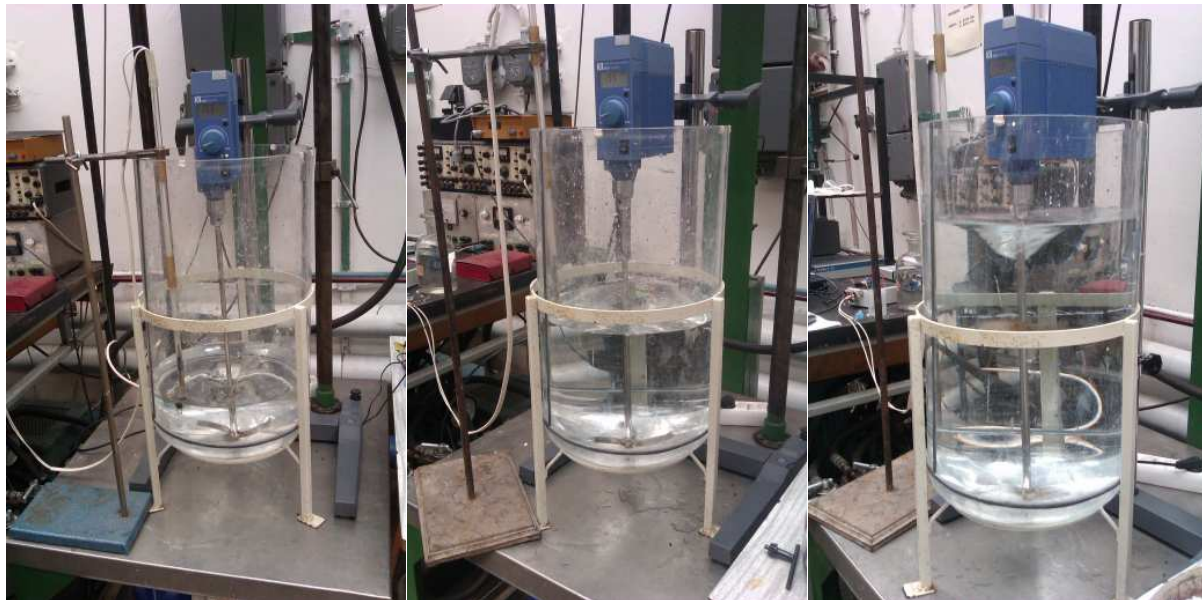
V první řadě bylo třeba získat představu o průběhu homogenizace v míchané vsádce tak, aby bylo možné nalézt kritická méně intenzivně promíchávaná místa. Pro tento účel byla použita odbarvovací metoda, která je podrobně popsána v [1]. Pro následné systematické experimenty měření doby homogenizace byla použita standardní vodivostní metoda [1]. Měřící objem vodivostní sondy byl umístěn do méně intenzivně promíchávaného místa, ve kterém dochází k homogenizaci nejpozději, tj. u stěny těsně pod hladinou (přibližně ve vzdálenosti $D/10$ od stěny nádoby a $D/4$ pod hladinou). Umístění vodivostní sondy je zřejmé z obr. 3. Pro jednoznačné vyhodnocení záznamů, tj. časové změny vodivosti, ze systematických experimentů a z důvodu dnes v moha průmyslových aplikacích požadovaného dosažení dokonale homogenní vsádky byl zvolen vyšší stupeň homogenity, tj. doba homogenizace t je definována jako čas potřebný k tomu, aby fluktuace koncentrace byly menší než 2 % celkové změny koncentrace. Měřená doba homogenizace byla vyhodnocena v bezrozměrném tvaru dle rov. (1) resp. (2).



Obr. 1. *Uspořádání navržené konfigurace míchaného zásobníku.*



Obr. 2. *Třílopatkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami s tvarem lopatek dle CVS 69 1043 ($\alpha = 67^\circ$; $\beta = 25^\circ$; $\gamma = 48^\circ$; $h/d = 0,2$).*



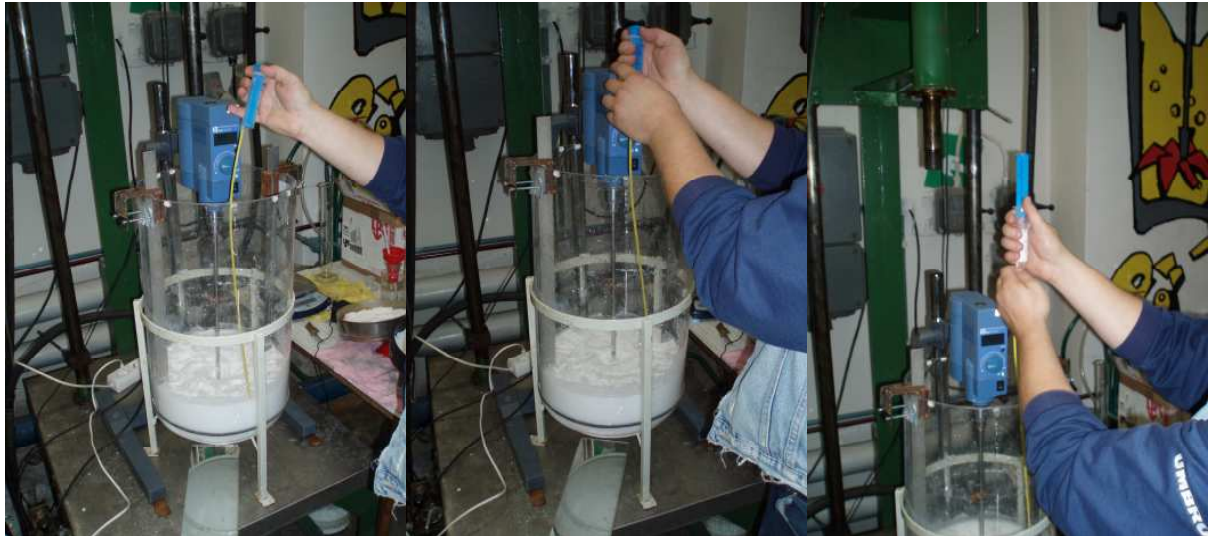
$H = 120 \text{ mm}$

$H = 250 \text{ mm}$

$H = 415 \text{ mm}$

Obr. 3. *Vodivostní měření doby homogenizace v modelu stávající konfigurace míchaného zásobníku při limitních stavech plnění.*

Na základě vodivostního měření doby homogenizace byla vytipována optimální geometrická konfigurace míchaného zásobníku, při které bylo dosaženo nejkratší doby homogenizace a to rovnoměrně při všech úrovních limitního plnění aparátu. Pro tuto geometrickou konfiguraci byl proveden experiment s reálnou suspenzí PVC, kdy homogenita suspenze byla hodnocena na základě odebírání vzorků o objemu 15 ml suspenze (viz obr. 4) z kritického místa u stěny těsně pod hladinou pro všechny limitní výšky plnění. Homogenizace suspenze PVC v optimalizované konfiguraci míchaného zásobníku je znázorněna na obr. 5. U takto odebraných vzorků byla sledována koncentrace částic PVC ve vzorku pomocí sedimentační zkoušky a měřena distribuce velikosti částic PVC v odebraném vzorku pomocí laserového analyzátoru Fritsch A-22.



$H = 120 \text{ mm}$

Obr. 4. Ukázka odběru vzorků suspenze PVC v modelu optimalizované konfigurace míchaného zásobníku.



$H = 120 \text{ mm}$

$H = 250 \text{ mm}$

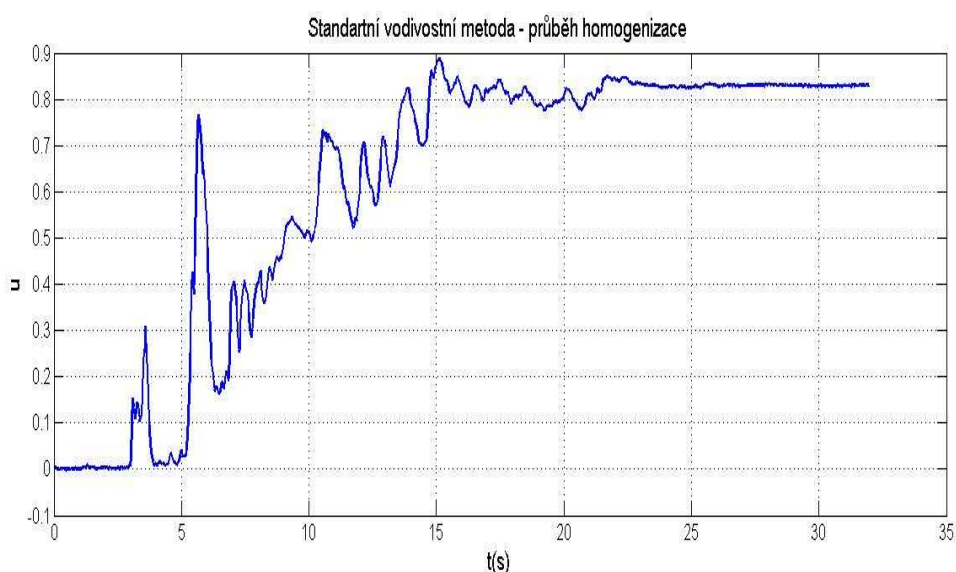
$H = 415 \text{ mm}$

Obr. 5. Homogenizace vzorků suspenze PVC v modelu optimalizované konfigurace míchaného zásobníku při limitních stavech plnění.

Příkon na hřídeli míchadla byl měřen pomocí tenzometrického snímače kroučícího momentu. Příkonová měření byla vyhodnocena ve tvaru bezrozměrné příkonové charakteristiky dle rov. (3).

5. Výsledky měření a diskuse

Doba homogenizace byla z naměřených průběhů závislosti napětí na čase stanovena pomocí Matlabu. Ukázka průběhu této závislosti je na obr. 6. Pro každou výšku hladiny určité konfigurace zařízení bylo provedeno pět sérií měření při různých frekvencích otáčení míchadla. Vzhledem k tomu, že průběh homogenizace je ovlivňován náhodnými vlivy opakujeme měření v každé sérii 5x a dobu homogenizace v každé ze sérií měření určíme jako aritmetický průměr těchto hodnot. Tabulka 1 ukazuje takto zpracované výsledky pro nádobu s výškou hladiny 120 mm.

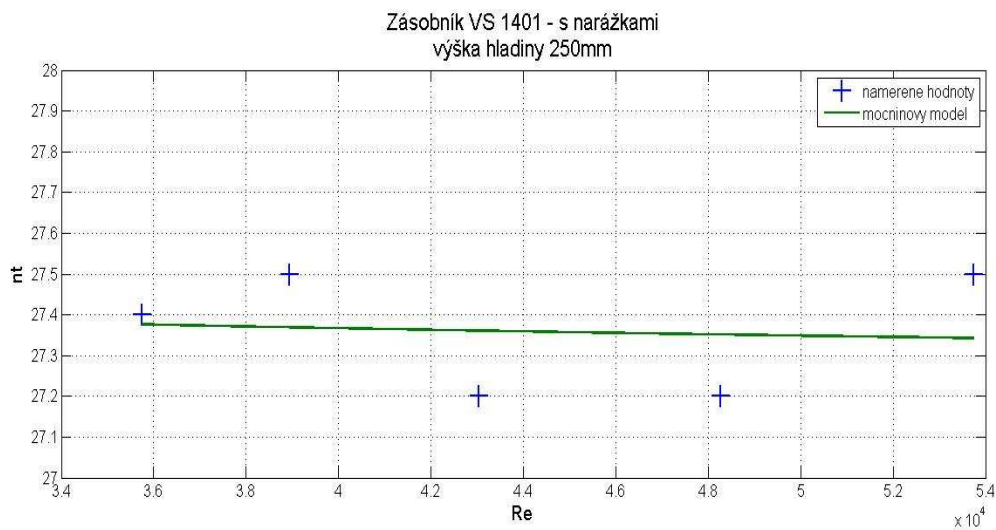


Obr. 6. Průběh závislosti napětí na čase při měření standartní vodivostní metodou.

Tabulka 1. Homogenizace míchané vsádky v modelovém míchaném zásobníku pro variantu s narážkami a výškou hladiny $H = 120$ mm.

n [1/min]	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	t ₄ [s]	t ₅ [s]	t _{průměr} [s]	Re [-]	nt [-]
154	5,8	5,5	5,7	6,6	6,1	5,9	35100	15,2
172	5,6	5,2	6,1	5,0	5,6	5,5	39200	15,7
189	4,3	3,9	4,6	5,4	5,9	4,8	43000	15,2
209	4,4	5,1	4,7	4,2	3,8	4,4	47600	15,4
232	3,9	4,0	3,8	3,8	4,0	3,9	52800	15,1

Závislost nt na Reynoldsově čísle byla pro všechny varianty stanovena pomocí nelineární regrese v Matlabu. Předpokládaná závislost má tvar $nt = C \cdot Re^n$. Ukázka grafu této závislosti je znázorněna na obrázku 7.



Obr. 7. Průběh mocninové závislosti nt na Reynoldsově čísle při měření standartní vodivostní metodou.

Výše popsaná mocninová závislost by platila v celém rozsahu Reynoldsových čísel. Z vypočtených Reynoldsových čísel vyplývá, že všechna měření probíhala v turbulentní oblasti. V této oblasti můžeme předpokládat konstantní závislost $nt = A$. Nahrazení mocninové závislosti konstantou bylo prováděno pomocí Testu o hypotézách o hodnotách A a B dle [5]. Statistické zpracování bylo prováděno pomocí Matlabu. Z výsledků vyplývá, že mocninovou závislost můžeme v turbulentní oblasti v rozsahu daném Reynoldsovými čísly, při kterých jsme měřili nahradit konstantní závislostí $nt = konst$. Pro popis závislosti $nt = f(Re)$ tedy použijeme tvar konstantní závislosti $nt = A$ s konstantami a intervaly spolehlivosti uvedenými v tabulce 2.

5.1. Stávající konfigurace míchaného zásobníku

V první fázi práce byla experimentálně sledována homogenizace v míchané vsádce v zásobníku stávající geometrie, tj. v nádobě bez radiálních narážek. Homogenizační experimenty probíhaly při výše popsaných třech limitních plnění zásobníku. Experimenty probíhaly v turbulentní oblasti proudění, což odpovídá provoznímu stavu zařízení, při kterém je hodnota Reynoldsova čísla $Re = 500000$, a byly vyhodnoceny ve tvaru bezrozměrné doby homogenizace dle rov. (2). Z výsledků shrnutých v tabulce 2 je zřejmé, že při stávající konfiguraci dochází ke značně nerovnoměrné homogenizaci při různém plnění zásobníku. Při nejnejpříznivější situaci plnění zásobníku těsně pod spodní hranu horního míchadla, tj. spodní radiální míchadlo musí zajistit homogenizaci největšího objemu, je třeba 3 ÷ 4 násobná doba homogenizace oproti minimální a maximální úrovni plnění zásobníku. Z těchto výsledků plyne, že současná konfigurace míchaného zásobníku není schopna zajistit rovnoměrnou homogenizaci míchané suspenze PVC a to zejména při výše popsaném kritickém plnění.

Tabulka 2. Homogenizace míchané vsádky v modelovém míchaném zásobníku s etážovým míchadlem.

<i>Varianta</i>	<i>Narážky</i>	<i>Míchadla*</i> (spodní / horní)	<i>Výška hladiny</i> <i>H [mm]</i>	<i>nt [-]</i>	<i>Re [-]</i>
Ba	NE	1 / 2	120	72 ± 13	34800 - 53300
Bb	NE	1 / 2	250	271 ± 11	38700 - 59200
Bc	NE	1 / 2	415	133 ± 9	35300 - 56500
Na	ANO	1 / 2	120	15,3 ± 0,3	35100 - 52800
Nb	ANO	1 / 2	250	27,4 ± 0,2	35800 - 53700
Nc	ANO	1 / 2	415	37,8 ± 0,8	38700 - 59400
NTc	ANO	1 / 3	415	55,3 ± 1,4	12600 - 19600

* Míchadlo: 1 – třílopatkové míchadlo se zakřivenými lopatkami Pfaudler (stávající geometrie)
2 – dvoulopatkové míchadlo se skloněnými lopatkami (stávající geometrie)
3 – třílopatkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami dle CVS 69 1043 ($D/d_2 = 4,5$)

5.2. Optimalizovaná konfigurace míchaného zásobníku

Z výsledků experimentálního sledování homogenizace a proudění v míchaném zásobníku stávající geometrické konfigurace je zřejmé, že používané etážové míchadlo v nádobě bez radiálních nárážek vyvolává v míchané vsádce zejména tangenciální proudění. Naopak pro homogenizaci vsádky v celém objemu je nutné, aby převládal axiální tok. Nejjednodušší úprava, kterou lze transformovat tangenciální tok na axiální je použití radiálních nárážek. Z provedených experimentů a předchozích zkušeností plyne, že je výhodné nádobu aparátu vybavit dvěma radiálními nárážkami o šířce $b = 0,1D$. Nárážky by měly být přivařeny ke stěně nádoby z plechu o tloušťce přibližně stejné jako je tloušťka stěny zásobníku a měly by zasahovat od hladiny při maximálním plnění až po anuloidový přechod mezi válcovou částí nádoby a klenutým dnem (viz obr. 1).

Z výsledků homogenizačních experimentů uvedených v tabulce 2 je zřejmé, že homogenizace v nádobě s radiálními nárážkami je mnohem rovnoměrnější a dosahuje kratších homogenizačních časů oproti stávající konfiguraci zásobníku. Použití nárážek bude doprovázeno zvýšením příkonu na hřídeli míchadla. Příkon na hřídeli míchadla závisí dle rov. (4) na páté mocnině jeho průměru. Z tohoto důvodu, aby bylo možné zachovat stávající výkon pohonu, byla testována i varianta etážového míchadla s horním třílopatkovým míchadlem s rovnými lomenými lopatkami dle obr. 2 o menším průměru, tj. poměr průměru nádoby k průměru míchadla $D/d_2 = 4,5$, které vykazovalo také ještě dostatečné homogenizační účinky (viz tab. 2).

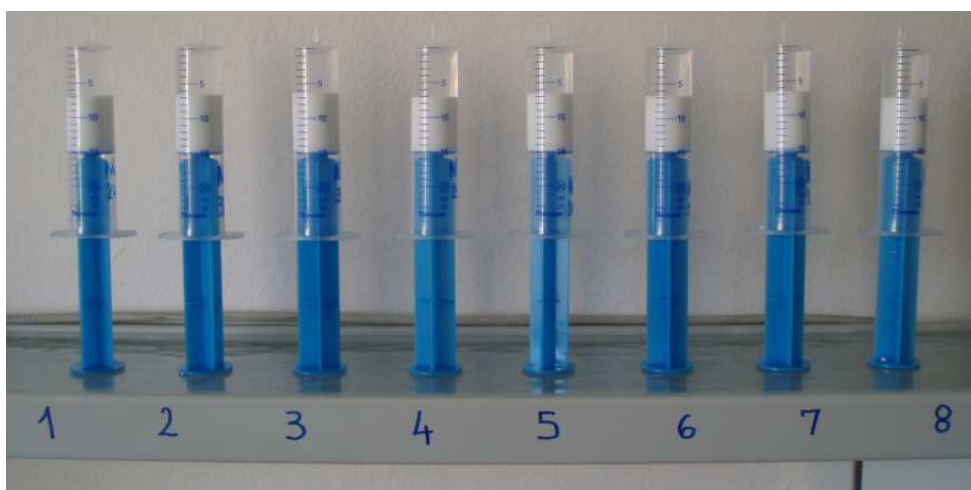
Pro geometrické konfigurace s radiálními nárážkami byl proveden experiment s reálnou suspenzí PVC, kdy homogenita suspenze byla hodnocena na základě odebrání vzorků o objemu 15 ml suspenze (viz obr. 4) z kritického místa u stěny těsně pod hladinou pro všechny limitní výšky plnění. U takto odebraných vzorků byla sledována koncentrace částic PVC ve vzorku pomocí sedimentační zkoušky, jejíž výsledky jsou shrnuty v tabulce 3. Dále pak byla měřena distribuce velikosti částic PVC v odebraném vzorku pomocí laserového analyzátoru

Fritsch A-22. Frekvence otáčení míchadla byla volena tak, aby odpovídala modelovacím kritériím pro přenos výsledků dle rov. (5). Pro exponent 0,8 byly stanoveny otáčky na modelu 335 min^{-1} odpovídající provozním otáčkám $42,5 \text{ min}^{-1}$. Pro modelování při konstantním měrném příkonu dle rov. (9) byly stanoveny otáčky míchadla na modelu 241 min^{-1} .

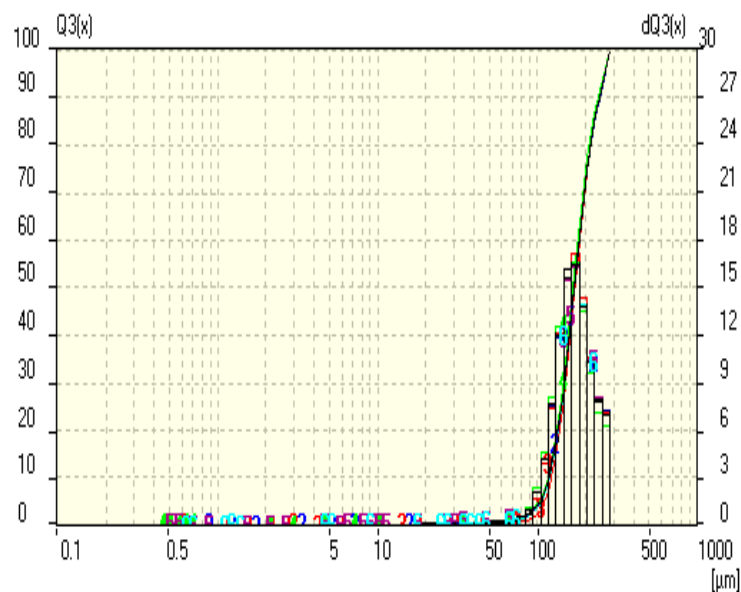
Tabulka 3. Homogenizace suspenze PVC v optimalizované geometrii míchaného zásobníku.

Var.	Otáčky míchadla $n [\text{min}^{-1}]$	Výška hladiny $H [\text{mm}]$	Míchadla* (spodní / horní)	Sedimentační test objem usazeniny[ml]
1	241	120	1 / 2	8
2	335	120	1 / 2	8
3	241	250	1 / 2	8
4	335	250	1 / 2	8
5	241	415	1 / 2	8
6	335	415	1 / 2	8
7	241	415	1 / 3	8
8	335	415	1 / 3	8

* Míchadlo: 1 – třílopatkové míchadlo se zakřivenými lopatkami Pfaudler (stávající geometrie)
 2 – dvoulopatkové míchadlo se skloněnými lopatkami (stávající geometrie)
 3 – třílopatkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami dle CVS 69 1043 ($D/d_2 = 4,5$)



Obr. 9. Výsledky sedimentačního testu odebraných vzorků suspenze PVC při homogenizaci v optimalizovaném míchaném zásobníku.



Obr. 10. Porovnání distribuce velikosti částic PVC v odebíraných vzorcích suspenze při homogenizaci suspenze v optimalizovaném míchaném zásobníku.



Obr. 11. Nehomogenita míchané vsádky v optimalizovaném míchaném zásobníku s třílopatkovým míchadlem s rovnými lomenými lopatkami s $D/d_2 = 4,5$.

Z výsledků plyne, že všechny testované konfigurace při obou úrovních modelování dostatečně zajistí homogenizaci míchané suspenze PVC při různých úrovních plnění zásobníku, tj. v každém odebraném vzorku byla stejná koncentrace pevné fáze (viz tab. 2 resp. sedimentační test obr. 9) a také bylo dosaženo stejné distribuce velikosti částic, která je pro všechny odběry znázorněná na obr. 10. Pouze u menšího průměru třílopatkového míchadla byla zřejmá nepatrná nehomogenita vsádky při maximálním plnění těsně pod hladinou, což je pro ilustraci znázorněno na obr. 11. Tento stav se jeví jako minimální možný použitelný průměr

třílopatkového míchadla s rovnými lomenými lopatkami, tj. poměr průměru nádoby k průměru míchadla $D/d_2 = 4,5$.

5.3. Příkon na hřídeli míchadla

Pro homogenizaci suspenze PVC při různém plnění zásobníku je třeba válcovou nádobu zásobníku vybavit dvěma radiálními narážkami o šířce $b = 0,1D$ (viz obr. 1). Použití narážek bude doprovázeno zvýšením příkonu na hřídeli míchadla. Z tohoto důvodu je třeba zkontrolovat, zda navýšení příkonu na hřídeli v provozním zařízení nepřesáhne výkon instalovaného elektromotoru. Proto bylo provedeno měření příkonu na hřídeli míchadla v konfiguraci stávajícího etážového míchadla v nádobě bez a s narážkami. Příkonové měření probíhalo v oblasti turbulentního proudění a bylo vyhodnoceno ve formě bezrozměrné příkonové charakteristiky dle rov. (3), kterou je možné v turbulentní oblasti vyjádřit pomocí konstantní hodnoty příkonového čísla Po dle rov. (4). V nádobě bez narážek byla při maximálním plnění zásobníku stanovena hodnota příkonového čísla

$$Po = 0,81, \quad (10)$$

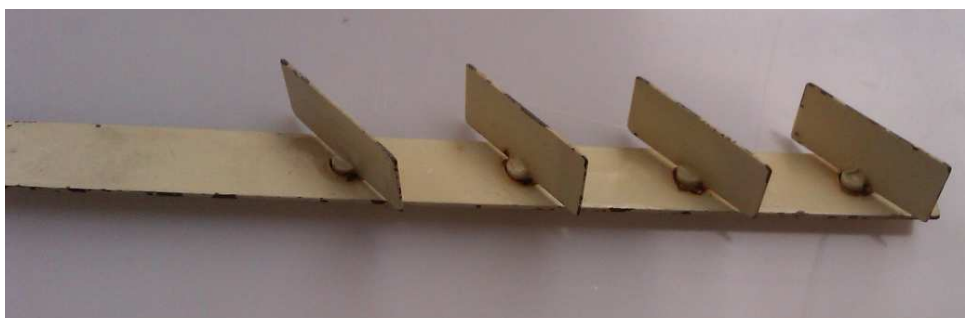
zatímco v nádobě vybavené dvěma radiálními narážkami bylo příkonové číslo

$$Po = 1,40. \quad (11)$$

Z příkonových měření plyne, že instalace dvou radiálních narážek do zásobníku se stávajícím etážovým míchadlem zvýší příkon na hřídeli o 70 %. Při provozním měření bylo zjištěno, že při stávajícím provedení zásobníku bez narážek byl na základě měření elektrických veličin naměřen výkon 5,5 kW. Instalace narážek by tedy zvýšila požadovaný výkon na 9,4 kW, což je na hranici instalovaného výkonu elektromotoru, tj. 11,8 kW.

Z tohoto důvodu doporučuji nejprve instalovat do nádoby dvě radiální narážky dle výše uvedeného doporučení. Pokud bude instalovaný výkon závislý i na aktuálním stavu elektromotoru dostatečný doporučuji ponechat stávající etážové míchadlo, což je investičně nejméně náročná varianta. Pokud by byl příkon motoru nedostatečný, tak navrhuji horní dvoulopatkové míchadlo zaměnit za menší třílopatkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami dle obr. 2, které má výrazně lepší čerpací účinnost. Vzhledem k tomu, že příkon na hřídeli míchadla závisí na páté mocnině jeho průměru dle rov. (4), tak při snížení průměru d_2 např. z 1500 mm na 1200 mm poklesne potřebný příkon etážového míchadla při konstantních otáčkách o 44 %. Použití etážového míchadla s horním třílopatkovým míchadlem s rovnými lomenými lopatkami o průměru $d_2 = 1200$ mm pak odpovídá provozní výkon cca 6,3 kW. Toto míchadlo zajistí dostatečnou homogenitu vsádky, neboť z výše uvedených experimentů je zřejmé, že minimální použitelný průměr horního třílopatkového míchadla pro dostatečnou homogenitu je 900 mm.

Další variantou, avšak technicky i investičně nejnáročnější, je instalovat do nádoby zásobníku dvě narážky s axiálními lopatkami, které by transformovaly tangenciální proudění na částečně axiální tok míchané vsádky dle obr. 12.



Obr. 12. Narážky s lopatkami pro vyvolání axiálního proudění v míchané vsádce.

6. Závěry a doporučení

- Konstrukční úpravy míchaného zásobníku na suspenzi PVC byly navrženy na základě modelových experimentů probíhajících na geometricky podobném míchacím zařízení. V první fázi experimentů byla popsána homogenizace míchané vsádky při stávajícím uspořádání míchacího zařízení při třech limitních úrovních plnění zásobníku. Na základě těchto úvodních experimentů byla poté navržena konstrukční úprava míchaného zásobníku, po takto kterou byla experimentálně opět při třech limitních úrovních plnění ověřena homogenizace míchané vsádky a to jak standardní vodivostní metodou, tak i s reálnou suspenzí PVC.
- Homogenizace míchané vsádky byla pro všechny testované geometrické konfigurace zařízení sledována při třech limitních úrovních plnění zásobníku. Minimální hladina odpovídala minimálnímu plnění do cca 10 % výšky zásobníku, tj. výška hladiny na modelu $H = 120$ mm, kdy byla vsádka míchána pouze spodním míchadlem typu Pfaudler. Maximální výška hladiny odpovídala maximálnímu plnění do cca 70 % výšky zásobníku, tj. výška hladiny na modelu $H = 415$ mm, kdy v míchané vsádce operovalo celé etážové míchadlo. Z hlediska provozu je další kritickou úrovní plnění zásobníku stav, kdy míchání vsádky je realizováno pouze spodním míchadlem, avšak při maximální výšce hladiny. Tento stav nastává při výšce hladiny dosahující těsně pod spodní hranu lopatek horního míchadla, čemuž odpovídá výška hladiny na modelu $H = 250$ mm.
- V první fázi práce byla experimentálně sledována homogenizace v míchané vsádce v zásobníku stávající geometrie, tj. v nádobě bez radiálních narážek. Při stávající konfiguraci dochází k značně nerovnoměrné homogenizaci při různém plnění zásobníku. Při nejnepríznivější situaci plnění zásobníku těsně pod spodní hranu horního míchadla, tj. spodní radiální míchadlo musí zajistit homogenizaci největšího objemu, je třeba $3 \div 4$ násobná doba homogenizace oproti minimální a maximální úrovni plnění zásobníku. Z těchto výsledků plyne, že současná konfigurace míchaného zásobníku není schopna zajistit rovnoměrnou homogenizaci míchané suspenze PVC a to zejména při výše popsaném kritickém plnění.
- Pro zlepšení homogenizace v míchaném zásobníku je třeba provést takovou konstrukční úpravu, aby v míchané vsádce převládal axiální tok, čehož lze dosáhnout instalací dvou radiálních narážek o šířce $b = 0,1D$ (viz obr. 1). Homogenizace v nádobě s radiálními narážkami je mnohem rovnoměrnější a dosahuje kratších homogenizačních časů oproti stávající konfiguraci zásobníku. Toto výrazné zlepšení homogenizace v navržené geometrické konfiguraci míchaného zásobníku s radiálními narážkami bylo potvrzeno i experimenty s reálnou suspenzí PVC.
- Z příkonových měření plyne, že instalace dvou radiálních narážek do zásobníku se stávajícím etážovým míchadlem zvýší příkon na hřídeli o 70 %. Při provozním měření bylo zjištěno, že při stávajícím provedení zásobníku bez narážek byl na základě měření elektrických veličin naměřen výkon 5,5 kW. Instalace narážek by tedy zvýšila požadovaný výkon na 9,4 kW, což je na hranici instalovaného výkonu elektromotoru, tj. 11,8 kW.
- Doporučuji nejprve instalovat do nádoby dvě radiální narážky o šířce $b = 0,1D$, tj. v provozním míchaném zásobníku o šířce $b = 400$ mm. Nárážky by měly být přivařeny ke stěně nádoby z plechu o tloušťce přibližně stejné jako je tloušťka stěny zásobníku a

měly by zasahovat od hladiny při maximálním plnění až po anuloidový přechod mezi válcovou částí nádoby a klenutým dnem (viz obr. 1). Takto instalované narážky navíc zvýší stabilitu štíhlé nádoby. Pokud bude instalovaný výkon závislejší i na aktuálním stavu elektromotoru dostatečný doporučuji ponechat stávající etážové míchadlo, což je **investičně nejméně náročná varianta**.

- Pokud by byl příkon motoru nedostatečný, tak navrhuji horní dvoulopatkové míchadlo zaměnit za třílopatkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami s tvarem lopatek dle oborové normy CVS 69 1043 (viz obr. 2) o průměru $d_2 = 1200$ mm a výšce lopatky $h = 240$ mm. Vzhledem k tomu, že příkon na hřídeli míchadla závisí na páté mocnině jeho průměru dle rov. (4), tak poté poklesne potřebný příkon celého etážového míchadla při konstantních otáčkách o 44 %. Použití etážového míchadla s horním třílopatkovým míchadlem s rovnými lomenými lopatkami o průměr $d_2 = 1200$ mm pak odpovídá provozní výkon cca 6,3 kW.
- Obě výše navržené varianty počítají se zachováním stávajícího pohonu, tj. elektromotoru o štítkovém výkonu 11,8 kW a převodovky s výstupními otáčkami hřídele $42,5 \text{ min}^{-1}$. Z toho plyne, že je možné použít i stávající hřídel a pouze v případě potřeby instalovat nové horní míchadlo dle výše uvedeného doporučení.

Seznam použitých symbolů a označení

b	šířka radiálních narážek	[m]
D	průměr nádoby	[m]
d_1	průměr spodního míchadla	[m]
d_2	průměr horního míchadla	[m]
H	výška hladiny	[m]
H_2	vzdálenost spodní hrany lopatek míchadla ode dna	[m]
H_3	vzájemná vzdálenost míchadel tvořících etážové míchadlo	[m]
h	šířka lopatky míchadla	[m]
n	frekvence otáčení míchadla	$[\text{s}^{-1}]$
P	příkon míchadla	[W]
Po	příkonové číslo $Po = \frac{P}{\rho n^3 d^5}$	[1]
Re	Reynoldsovo číslo $Re = \frac{nd^2 \rho}{\mu}$	[1]
t	doba homogenizace	[s]
V	objem vsádky	$[\text{m}^3]$
α	exponent v rov. (5)	[1]
ε	měrný příkon	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-3}]$
μ	dynamická viskozita	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
ρ	hustota suspenze PVC	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

Seznam použité literatury

- [1] Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., Kresta, S. M.: *Handbook of industrial mixing: science and practice*. Canada: Wiley-Interscience, 2003, 1377 s.
- [2] Rieger, F., Novák, V., Jirout, T.: *Hydromechanické procesy II*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. 167 s. ISBN 80-01-03302-3.

- [3] Jirout, T., Rieger, F.: *Scale-up of Mixing Equipment for Suspensions*. Chemical and Process Engineering - Inżynieria Chemiczna i Procesowa. 2009, vol. 30, no. 3, p. 359-367. ISSN 0208-6425.
- [4] Jirout, T., Rieger, F., Jembere, S.: *Čerpací účinky axiálních míchadel*. In: Zborník príspevkov 6. medzinárodnej vedeckej konferencie Strojné inžinierstvo [CD-ROM]. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2002, s. 1-9. ISBN 80-227-1783-5.
- [5] Ambroz, F.: *Statistické zpracování experimentálních dat*. Výukový text, ČVUT, 2011. s. 32.