

Intenzifikace míchání v technologii suspenzní polymerace PVC v reaktoru o objemu 40 m³ a 80 m³.

Bc. Vít Pešava

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

Abstrakt

V této práci byly navrhovány konstrukční úpravy míchání reaktoru, které zlepší jeho funkci. Reaktor musí zajistit homogenizaci surovin, rovnoměrné rozložení smykového napětí z důvodu krystalizace a homogenizaci suspenze PVC. Při dávkování surovin je třeba zajistit jejich dostatečnou dispergaci již od minimálního plnění až po kritické plnění těsně pod hranu horních narážek. Na jakost produktu má zásadní vliv počáteční dispergace (emulgace) monomeru, která musí být rovnoměrná z hlediska velikosti a distribuce emulgovaných kapek. Nejprve byly experimentálně zjištěny hodnoty homogenizace na modelu stávajícího zařízení. Na základě těchto výsledků byly navrženy a experimentálně ověřeny úpravy míchání. Z provozních hodnot byly určeny příkonové charakteristiky reaktoru. Z těchto charakteristik byly následně navrženy parametry nového reaktoru.

Klíčová slova

Míchání, homogenizace, zvětšování měřítka, dispergace, PVC, narážky.

1. Zadání a základní informace

Návrh míchání reaktoru R 80 a optimalizace míchání reaktoru R 40 pro zajištění požadované kvality produktu.

Výrobní proces v reaktoru začíná nadávkováním potřebného množství demineralizované vody. Pomocné látky se do reaktoru přidávají jednak zároveň s dávkováním vody a dále po tomto procesu. Následuje průběžné dávkování VCM zároveň s dávkováním vody a jeho polymerace. Při nedostatečném míchání dochází k nežádoucímu vzniku velkých částic polymeru. Naopak při vysoké rychlosti míchání je nebezpečí deformací a nepravidelného tvaru částic, případně může dojít i k jejich aglomeraci.

Z popisu výrobního procesu je zřejmé, že náplň reaktoru musí být rovnoměrně míchána po celou dobu výrobního procesu. Reaktor musí při různých úrovních plnění zajistit:

- dispergaci (emulgaci) a homogenizaci surovin
- rovnoměrné rozložení intenzity míchání (tj. rovnoměrné rozložení smykového napětí z důvodu krystalizace)
- homogenizaci suspenze PVC

Návrh míchání reaktoru R 80 vychází z geometrie a provozních záznamů stávajícího reaktoru R 40 o polovičním pracovním objemu a z optimalizace geometrického uspořádání na základě experimentů uvedených v této práci. Reaktor R 40 je tvořen válcovou nádobou s klenutým dnem i víkem se dvěma narážkami v horní části. Střední narážky jsou umístěny ve výšce 4175 mm od dna reaktoru. Výška narážek je 1000 mm. Průměr válcové části reaktoru je $D = 3200$ mm a jeho celková výška je 6000 mm (výška válcové části je 4170 mm). Maximální hladina je ve výšce 5085 mm od dna reaktoru. Návrh parametrů reaktoru R 80 vychází z v současnosti realizované části reaktoru doplněné o předanou výkresovou dokumentaci reaktoru.

Předané provozní záznamy obsahují časové průběhy proudu motoru míchadla, hmotnosti vody a VCM v reaktoru a dále tlaku a teploty v reaktoru. Z provozních záznamů je zřejmé, že výška hladiny H se po počátečním nadávkování na cca 10 % maximální hladiny průběžně zvyšuje až na úroveň maximální hladiny.

V současnosti se dle předané dokumentace pro míchání používá míchadlo se třemi zakřivenými lopatkami (tzv. Pfaudler) o průměru $d = 2200$ mm a s výškou lopatky 330 mm. Výška spodní hrany lopatky míchadla nade dnem je $H_2 = 200$ mm. Otáčky míchadla jsou $n = 63 \text{ min}^{-1}$ a $n = 70 \text{ min}^{-1}$. Štítkový výkon instalovaného elektromotoru je 80 kW. Nejvyšší příkon motoru vypočtený z provozních měření elektrických veličin je 65,7 kW.

Pro experimenty potřebné pro návrh úprav míchaného zásobníku byly dodány vzorky suspenze PVC o hustotě $\rho = 1410 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

2. Metodika řešení

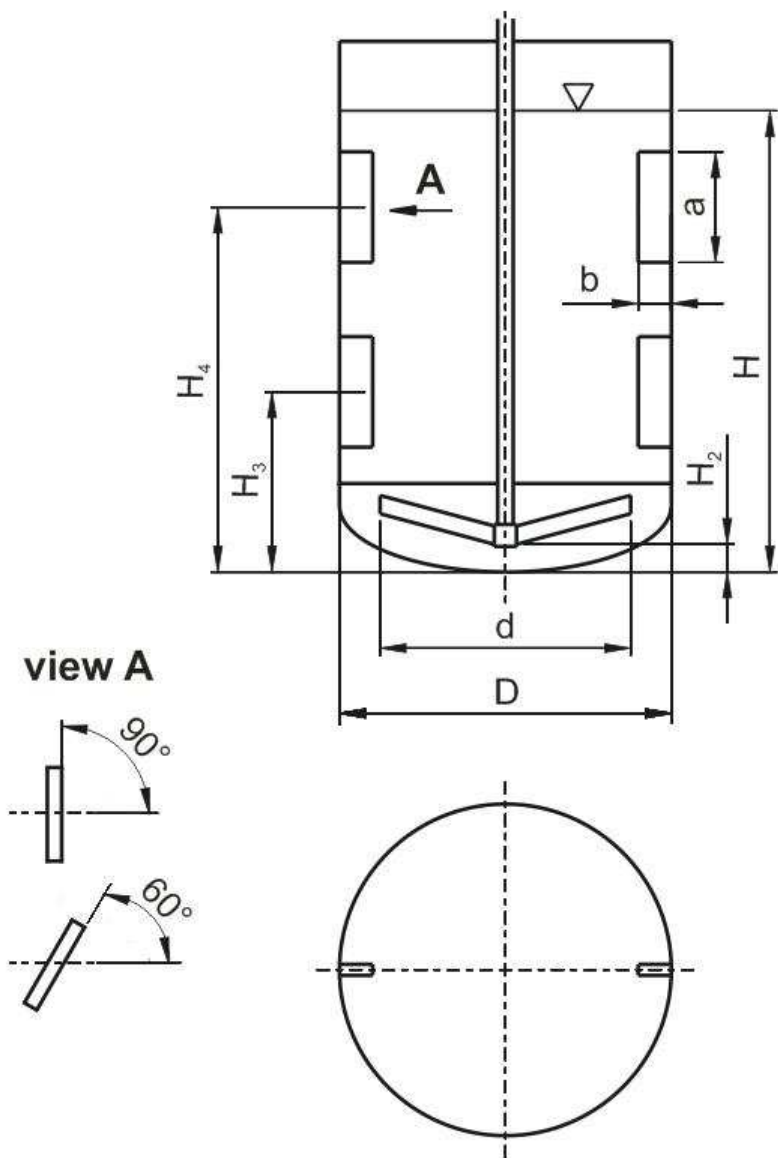
Návrh geometrie reaktoru R 80 byl proveden na základě zkušeností se stávajícím reaktorem R 40 a dále s využitím poznatků o navrhování míchadel se zakřivenými lopatkami tzv. Pfaudler publikovanými např. v [1]. Na tomto základě byly navrženy geometrické parametry zařízení pro zajištění optimální dispergace a homogenizace míchané vsádky a zajištění jejího rovnoměrného míchání. Navržené geometrické parametry míchaného systému jsou znázorněny na obr. 1 resp. uvedeny v tab. 1.

Tabulka 1. Navržená geometrická konfigurace míchání reaktoru.

Třílopatkové míchadlo se zakřivenými lopatkami (tzv. Pfaudler)	
Průměr míchadla d	$D / d = 1,5$
Výška lopatky míchadla h	$h / d = 0,15$
Narážky (2 x 2 nárážky nad sebou)	
Výška nárážky a	$a / D = 1/3$
Šířka nárážky b	$b / D = 0,1$

Z experimentů uvedených v této práci vyplývá, že pro intenzifikaci míchání je třeba do reaktoru R 40 přidat dvojici nárážek do spodní části reaktoru tak, aby v celém objemu míchané vsádky převládal axiální tok suspenze. S ohledem na možnosti stávající konstrukce budou tyto nárážky zasazeny do stávajících nepoužívaných hrdel ve výšce 1775 mm od dna reaktoru. U reaktoru R 80 budou spodní nárážky umístěny do připravených otvorů ve výšce 2300 mm od dna reaktoru a horní nárážky do otvorů ve výšce 5400 mm od dna reaktoru.

Návrh a konstrukční úpravy reaktorů byly navrženy na základě modelových experimentů probíhajících na geometricky podobném míchacím zařízení o průměru $D = 300$ mm 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 [2, 3 a 4].



Obr. 1. Uspořádání navržené konfigurace míchaného reaktoru.

V první fázi experimentů byla popsána homogenizace míchané vsádky při stávajícím uspořádání míchacího zařízení R 40 při třech limitních úrovních plnění reaktoru. Těmito limitními úrovněmi jsou nejnižší hladina, kdy je plně zatopeno míchadlo, maximální hladina, kdy jsou plně zatopeny horní narážky a hladina, kdy náplň dosahuje pod spodní hranu horní narážky. V tomto nejnepříznivějším případě musí míchadlo zajistit homogenizaci maximálního objemu bez efektu použití narážek. Na základě těchto úvodních experimentů byla poté navržena konstrukční úprava reaktoru. 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. Homogenizace byla ověřována pro dva různé sklony narážek 60° a 90° (viz obr. 2). Na závěr byly z předaných provozních záznamů elektrických veličin a příkonových experimentů stanoveny příkonové charakteristiky (měrný příkon a příkonové číslo) míchadla reaktoru R 40 při různých úrovních plnění aparátu. Na základě maximálního příkonu při procesu polymerace byly určeny návrhové parametry tří variant míchadel reaktoru R 80.

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 míchadlem se třemi zakřivenými lopatkami (tzv. Pfaudler) o průměru $d = 206$ mm a výškou lopatky 31 mm. Výška spodní hrany lopatky míchadla nade dnem byla $H_2 = 18$ mm. Nádoba byla vybavena dvojicí nastavitelných narážek o výšce $a = 99$ mm a šířce $b = 23$ mm se středy narážek umístěnými ve výšce $H_4 = 360$ mm. Při následné optimalizaci zařízení z hlediska dispergace surovin a homogenizace míchané vsádky byla nádoba vybavena dalšími dvěma nastavitelnými narážkami o výšce $a = 99$ mm a šířce $b = 23$ mm se středy narážek umístěnými ve výšce $H_3 = 175$ mm. Měření byly varianty s různými kombinacemi sklonu narážek, přičemž byly použity úhly sklonu narážek 60° a 90° (viz obr. 1 a 2). Všechny měřené varianty jsou uvedeny v tabulce 3. Geometrická konfigurace míchaného reaktoru je znázorněna na obr. 1 resp. v tab. 1.

Homogenizace míchané vsádky byla pro všechny testované geometrické konfigurace zařízení sledována při třech limitních úrovních plnění reaktoru. Minimální hladina odpovídala plnění do cca 25 % výšky maximální hladiny, tj. výška hladiny na modelu $H = 120$ mm, kdy je zcela zatopeno míchadlo. Maximální výška hladiny odpovídala maximálnímu plnění, tj. výška hladiny na modelu $H = 415$ mm, kdy jsou zatopeny oba páry narážek. Z hlediska provozu je další kritickou úrovní plnění reaktoru stav, kdy výška hladiny dosahuje těsně pod spodní hranu horního páru narážek, čemuž odpovídá výška hladiny na modelu $H = 300$ mm.



*horní narážky 90°
spodní narážky 90°*



*horní narážky 60°
spodní narážky 90°*

Obr. 2. Ukázka variant uspořádání narážek.

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 [3]. Pro následné systematické experimenty měření doby homogenizace byla použita standardní vodivostní metoda [3]. Měřící objem vodivostní sondy byl umístěn do méně intenzivně promíchaného 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 mnoha 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).

Na základě vodivostního měření doby homogenizace byly vytipovány dvě optimální geometrické konfigurace míchaného reaktoru, při kterých bylo dosaženo nejkratší doby homogenizace a to rovnoměrně při všech úrovních limitního plnění aparátu. Pro tyto geometrické konfigurace byl proveden experiment s reálnou suspenzí PVC, kdy homogenita suspenze byla hodnocena na základě odebrání vzorků o objemu 17 ml suspenze 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 a měřena distribuce velikosti částic PVC v odebraném vzorku pomocí laserového analyzátoru Fritsch A-22.



$H = 120 \text{ mm}$

$H = 300 \text{ mm}$

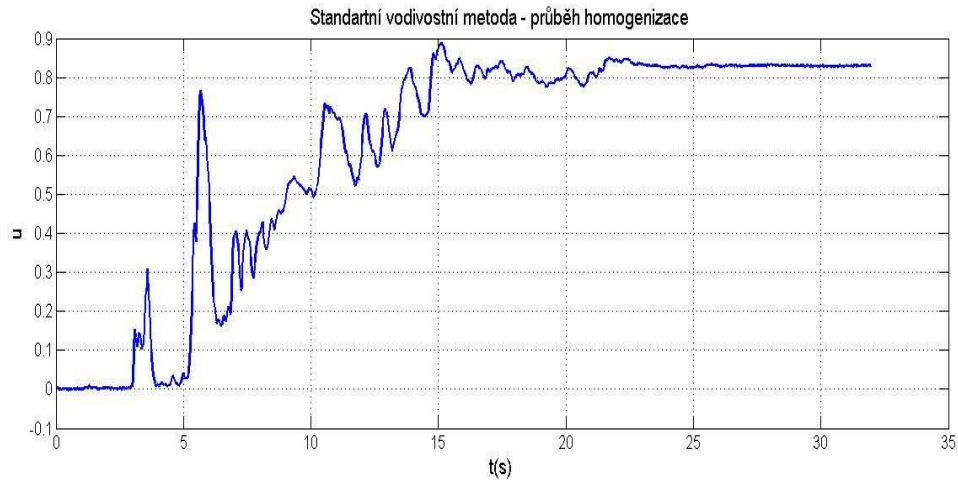
$H = 415 \text{ mm}$

Obr. 3. Ukázka vodivostního měření doby homogenizace při limitních stavech plnění.

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. 4. Pro každou výšku hladiny určité konfigurace zařízení byly provedeny čtyři série 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

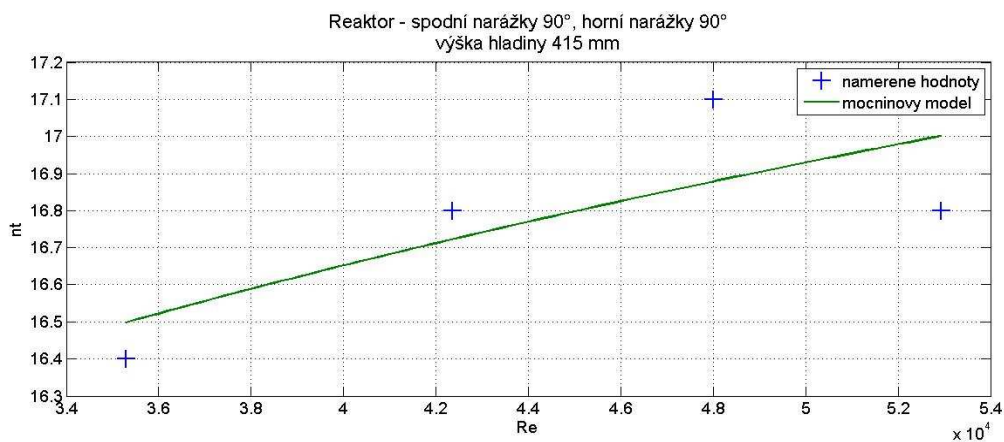
aritmetický průměr těchto hodnot. Tabulka 2 ukazuje takto zpracované výsledky pro nádobu s narážkami a s výškou hladiny 415 mm.



Obr. 4. Průběh závislosti napětí na čase při měření standartní vodivostní metodou.

Tabulka 2. Homogenizace míchané vsádky v modelovém reaktoru pro variantu se sklonem horních i spodních narážek 90° a výškou hladiny $H = 415$ mm.

n [1/min]	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	t ₄ [s]	t ₅ [s]	t _{průměr} [s]	Re [-]	nt [-]
50	29.9	29.0	27.2	23.3	26.7	27.2	35300	22.7
58	17.5	25.8	24.9	22.4	18.8	21.9	41000	21.1
67	20.9	21.2	19.2	20.4	18.7	20.1	47300	22.4
78	15.8	16.2	17.7	15.1	16.1	16.2	55100	21.0



Obr. 5. Průběh mocninové závislosti nt na Reynoldsově čísle při měření standartní vodivostní metodou.

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 5.

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 [7]. 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 3.

5.1. Měření homogenizace vodivostní metodou

V první fázi práce byla experimentálně sledována homogenizace v míchané vsádce v reaktoru stávající geometrie, tj. v nádobě bez spodních radiálních narážek. Homogenizační experimenty probíhaly při výše popsaných třech limitních plnění reaktoru při různých kombinacích úhlů sklonu narážek. Experimenty probíhaly v turbulentní oblasti proudění, což odpovídá provoznímu stavu zařízení, při kterém je minimální hodnota Reynoldsova čísla $Re = 3500000$, a byly vyhodnoceny ve tvaru bezrozměrné doby homogenizace dle rov. (2).

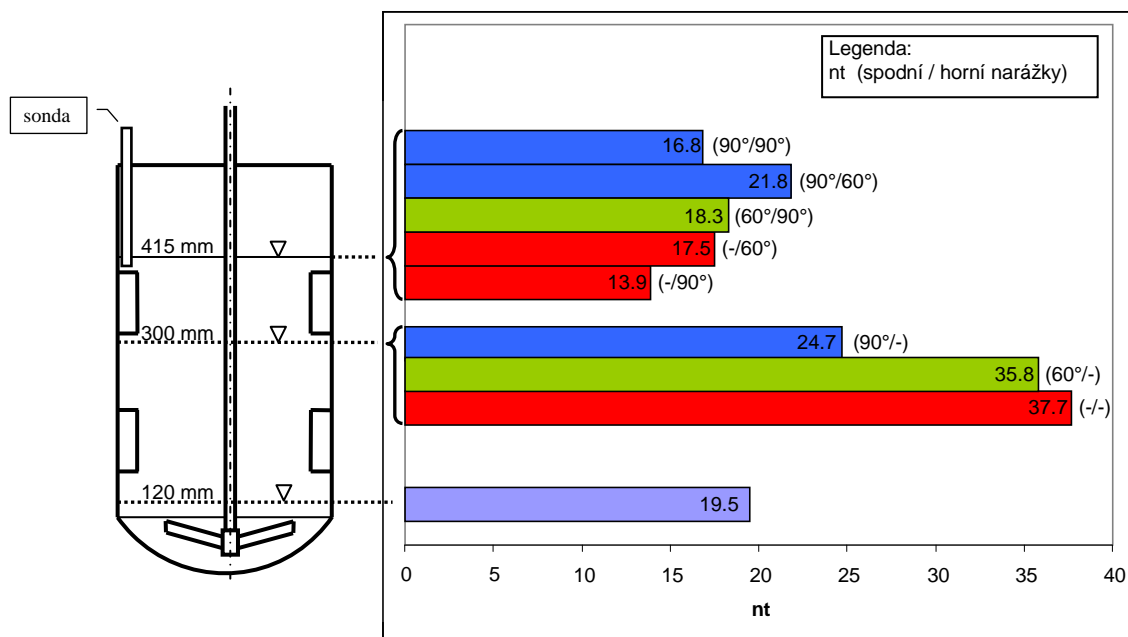
Tabulka 3. Homogenizace míchané vsádky v modelovém míchaném reaktoru.

Variantá	Narážky (spodní / horní)*	Výška hladiny H [mm]	nt [-]	Re [-]
Ea	- / -	120	$19,5 \pm 0,5$	35300 - 41000
Eb	NE / -	300	$37,7 \pm 0,3$	35300 - 54400
E9c	NE / 90°	415	$13,9 \pm 0,1$	35300 - 55800
E6c	NE / 60°	415	$17,5 \pm 0,5$	35300 - 55100
Ab	90° / -	300	$24,7 \pm 1,2$	35300 - 55100
A9c	90° / 90°	415	$16,8 \pm 0,5$	35300 - 53000
A6c	90° / 60°	415	$21,8 \pm 1,4$	35300 - 55000
A69b	60° / -	300	$35,8 \pm 1,9$	35300 - 52200
A69c	60° / 90°	415	$18,3 \pm 0,3$	35300 - 52200

*Narážky: NE ... bez narážek
 - ... přítomnost narážek nemá vliv na výsledek (hladina pod narážky)
 60° ... sklon narážek 60°
 90° ... sklon narážek 90°

Z výsledků shrnutých v tabulce 3 resp. na obrázku 6 je zřejmé, že při stávající konfiguraci dochází ke značně nerovnoměrné homogenizaci při různém plnění reaktoru. Při nejnepríznivější situaci plnění reaktoru těsně pod spodní hranu horních narážek, tj. radiální míchadlo Pfaudler musí zajistit homogenizaci největšího objemu vsádky bez vlivu narážek, je třeba dvojnásobná doba homogenizace oproti minimální a maximální úrovni plnění reaktoru. Z těchto výsledků plyne, že současná konfigurace míchaného reaktoru není schopna zajistit rovnoměrnou homogenizaci míchané vsádky a to zejména při výše popsaném kritickém plnění.

Pro zlepšení dispergace surovin a homogenizace v míchaném reaktoru je třeba provést takovou konstrukční úpravu, aby v celém objemu míchané vsádky převládal rovnoměrný axiální tok, čehož lze dosáhnout instalací dvou radiálních narážek o šířce $b = 0,1D$ a výšce $a = 1/3D$ do spodní i horní části reaktoru (viz obr. 1). Z výše uvedených výsledků je pak zřejmé, že nejvhodnější je konfigurace 2 x 2 narážky, přičemž sklon spodních narážek musí být 90° . Z výsledků je zřejmé, že spodní narážky se sklonem 60° mají na rychlost homogenizace jen velmi malý vliv. Rychlost homogenizace je v tomto případě téměř stejná, jako u konfigurace bez spodních narážek. Horní narážky zajišťují při obou úhlech sklonu 60° i 90° velmi dobrou rychlost homogenizace přijatelnou v obou případech i z hlediska rovnoměrnosti homogenizace v celém objemu reaktoru. V případě úhlu sklonu narážek 60° je rychlost homogenizace nižší než při úhlu sklonu 90° .



Obr. 6. Naměřené hodnoty homogenizace v modelu reaktoru (všechny varianty).

5.2. Měření homogenizace suspenze PVC

Pro obě výše zmíněné geometrické konfigurace se sklonem spodních narážek 90° a sklonem horních narážek 90° a 60° byl proveden experiment s reálnou suspenzí PVC, kdy homogenita suspenze byla hodnocena na základě odebrání vzorků o objemu 17 ml suspenze (viz obr. 7) z kritického místa u stěny pro všechny limitní výšky plnění při všech testovaných variantách. U takto odebraných vzorků byla sledována koncentrace částic PVC ve vzorku pomocí sedimentační zkoušky, jejíž výsledky jsou shrnuty v tabulce 4. 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 modelování při konstantním měrném příkonu dle rov. (9) byly stanoveny otáčky míchadla na modelu 305 min^{-1} odpovídající provozním frekvenci otáčení míchadla 63 min^{-1} . Vzhledem k tomu, že při míchání vsádky má na proudění značný vliv tangenciální tok, dochází v míchané vsádce ke tvorbě středového víru. V tomto případě je třeba zajistit, aby na modelu i na díle nedocházelo k areaci (přisávání plynu) právě tímto středovým vírem. Pro tento účel bylo navrženo v [5] modelování při konstantní hodnotě Froudova čísla, tj. exponent v modelovacím kritériu dle rov. 5 je $\alpha = 0$. Frekvence otáčení míchadla na modelu je pak 205 min^{-1} . Nejvyšší otáčky na modelu při experimentu však byly omezeny pozorovanou areací ze středového víru resp. hladinou. Z tohoto důvodu bylo nutné před započatím měření stanovit pro každou hladinu nejvyšší možné otáčky, při kterých ještě nedochází k areaci hladinou. S rostoucí úrovní hladiny rostly i tyto kritické otáčky míchadla. Při měření každé z vyšších hladin bylo tedy nutno odebrat také vzorky při nižších otáčkách, náležejících předchozí nižší hladině. Tyto vzorky byly odebírány jak z místa těsně pod současnou hladinou, tak i z úrovně předchozí nižší hladiny. Tímto způsobem byla ověřována platnost výsledků měření s nižšími otáčkami i pro ostatní úrovně plnění.



Obr. 7. Výsledky sedimentačního testu odebraných vzorků suspenze PVC při homogenizaci v optimalizovaném míchaném reaktoru.

Z výsledků uvedených v tab. 4 plyne, že při všech variantách s 2 x 2 narážkami, tj. úhlem sklonu spodních narážek 90° a úhly sklonu horních narážek 60° i 90° dochází k dostatečné homogenizaci suspenze při všech limitních stavech plnění. Nejrovnoměrnější homogenizace je však při variantě 2 x 2 narážky s úhlem sklonu $90^\circ / 90^\circ$. U všech odebraných vzorků bylo také dosaženo stejné distribuce velikosti částic.

6. Maximální příkon na hřídeli míchadla v reaktoru R 40

Příkony na hřídeli míchadla a hodnoty příkonových čísel Po byly vyhodnoceny z předaných provozních měření elektrických veličin na reaktoru R 40 při různých provozních režimech. Z těchto průběhů byly vybrány nejvyšší naměřené výkony elektromotoru pro dva typy várek (R 12, R 25).

Tabulka 4. Homogenizace suspenze PVC v optimalizované geometrii míchaného reaktoru.

Varianta	Otáčky míchadla n [min^{-1}]	Výška hladiny H [mm]	Výška odběru vzorku (měřeno ode dna) [mm]	Narážky - úhel (spodní / horní)	Sedimentační test objem usazeniny [ml]
aa85	85	120	120	hladina pod nárazky	12
bb85	85	300	300	90° / hladina pod nárazky	12,5
ba85	85	300	120	90° / hladina pod nárazky	12
bb100	100	300	300	90° / hladina pod nárazky	12
ba100	100	300	120	90° / hladina pod nárazky	12
6cc100	100	415	415	90° / 60°	12
6cb100	100	415	300	90° / 60°	12
6ca100	100	415	120	90° / 60°	13
6cc140	140	415	415	90° / 60°	12
6cb140	140	415	300	90° / 60°	12,5
6ca140	140	415	120	90° / 60°	12
9cc100	100	415	415	90° / 90°	12
9cb100	100	415	300	90° / 90°	12
9ca100	100	415	120	90° / 90°	12
9cc140	140	415	415	90° / 90°	12
9cb140	140	415	300	90° / 90°	12,5
9ca140	140	415	120	90° / 90°	12

Z naměřených hodnot proudu určíme příkon motoru míchadla ze vztahu:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (10)$$

kde účinník byl odhadnut $\cos \varphi = 0,9$.

Z vypočtených hodnot Reynoldsova čísla

$$Re = \frac{nd^2\rho}{\mu}, \quad (11)$$

v míchané vsádce při provozním stavu uvedených v tab. 5 vyplývá, že provozní míchání probíhá v turbulentní oblasti proudění v míchané vsádce. Z teoretického rozboru vyplývá, že v turbulentní oblasti nezávisí příkonové číslo Po na Reynoldsově čísle Re . Příkonové číslo Po je pak možné stanovit ze jeho definice dle rov. (4). Nejvyšší naměřené výkony elektromotoru míchacího ústrojí a vypočítané hodnoty příkonového čísla Po pro dva typy várek jsou uvedeny v tabulce 5.

Hodnota dynamické viskozity pro výpočet Reynoldsova čísla byla odhadnuta z následujícího vztahu

$$\mu = \mu_L \cdot \left[1 + \frac{2,5 \cdot c_v}{2 \cdot \left(1 - \frac{c_v}{0,605} \right)} \right]^2 \approx 2 \text{ mPa} \cdot \text{s} \quad (12)$$

doporučeného dle [6] pro výpočet dynamické viskozity koncentrovaných suspenzí o objemové koncentraci pevné fáze c_v .

Z provozních příkonových měření je možné stanovit měrný příkon

$$\varepsilon = \frac{P}{V}, \quad (13)$$

potřebný pro zajištění komplexního procesu dispergace surovin, homogenizace a krystalizace v míchaném reaktoru. Hodnoty měrného příkonu v reaktoru R 40 o maximálním pracovním objemu $V = 40 \text{ m}^3$ při maximálním příkonu na hřídeli míchadla pro oba typy várek byly určeny v rozmezí $1360 \div 1640 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$. Tyto hodnoty odpovídají intenzivnímu míchání což je v souladu s doporučenými hodnotami v [2 a 3].

Tabulka 5. Nejvyšší naměřené výkony elektromotoru míchadla.

Várka	Otáčky míchadla $n [\text{min}^{-1}]$	Úhel sklonu narážek $[\circ]$	Hustota suspenze $\rho [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Průměr míchadla $d [\text{m}]$	Výkon motoru $P [\text{W}]$	Příkonové číslo $Po [-]$	$Re [-]$
R 12	63	60	1410	2,2	54 300	0,65	3 583 000
R 25	70	90	1410	2,2	65 700	0,57	3 981 000

7. Návrh parametrů reaktoru R 80

Geometrické uspořádání míchaného reaktoru R 80 vychází ze stávajícího stavu realizovaného tělesa aparátu a předané výkresové dokumentace. Výše provedené experimenty prokázaly, že pro optimální míchání vsádky v reaktoru je třeba do nádoby instalovat dva páry narážek. Narážky doporučuji ponechat ve stávajícím umístění v nádobě reaktoru R 80. Geometrie a procesní charakteristiky míchadla byly přeneseny z experimentálního modelu i z hodnot naměřených v provozně ověřených stavech na menším reaktoru R 40.

Příkon na hřídeli míchadla reaktoru R 80 o objemu 80 m^3 lze stanovit z technologicky ověřené hodnoty měrného příkonu při maximálním příkonu na hřídeli míchadla $\varepsilon = 1640 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ z upraveného tvaru rov. (13):

$$P = \varepsilon \cdot V \quad (14)$$

Z definice příkonového čísla Po dle rov. (4) je možné úpravou získat frekvenci otáčení míchadla n při příkonu P stanoveného dle rov. (14):

$$n = \sqrt[3]{\frac{P}{Po \cdot \rho \cdot d^5}} \quad (15)$$

Hodnotu příkonového čísla míchadla v reaktoru R 80 se dvěma páry narážek je možné stanovit na základě provozních měření v reaktoru R 40 s přihlédnutím k závěrům uvedeným v [1] pro míchadla se zakřivenými lopatkami v nádobě s radiálními narážkami. Pro výpočet frekvence otáčení míchadla byla uvažována hodnota příkonového čísla $Po = 0,85$.

Navržené parametry reaktoru R 80 o vnitřním průměru $D = 3936$ mm jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6. Navržené parametry míchacího ústrojí reaktoru R 80.

Číslo varianty	1	2	3
Typ míchadla	Pfaudler	Pfaudler	Pfaudler
Číslo výkresu	HV 512 000	HV 510 000	dle experimentu*
Průměr míchadla d [mm]	3000	2500	2620
Výška lopatky míchadla h [mm]	505	435	393
D / d	1,31	1,57	1,5
h / d	0,17	0,17	0,15
Příkon na hřídeli míchadla P [kW]	131,2	131,2	131,2
Otáčky míchadla n [min^{-1}]	46	62	58

* Míchadlo dle modelu použitým při experimentu - geometricky podobné míchadlu v reaktoru R 40

8. Dispergace (emulgace) surovin

Při dávkování přehřáté demineralizované vody, monomeru a dalších aditiv je třeba zajistit jejich dostatečnou dispergaci již od minimálního plnění až po kritické plnění těsně pod hranu horních narážek. Na jakost produktu má zásadní vliv počáteční dispergace (emulgace) monomeru, která musí být rovnoměrná z hlediska velikosti a distribuce emulgovaných kapek. Velikost dispergovaných kapek nízkoviskózních kapalin závisí dle [3] nejen na fyzikálních vlastnostech kapalin (hustota a povrchové napětí), ale i na disipovaném měrném příkonu v míchané vsádce. Tuto závislost je možné dle [3] vyjádřit v následujícím tvaru

$$d_{32} \approx \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{3/5} \epsilon_m^{-2/5} \quad (16)$$

Z tohoto důvodu je třeba věnovat pozornost rovnoměrné disipaci energie v míchané vsádce a to zejména v limitních stavech míchání vsádky. Z výsledků modelových homogenizačních experimentů ve stávající geometrické konfiguraci reaktoru R 40, tj. pouze

s horními narážkami, je zřejmé, že při dávkování surovin není zaručena rovnoměrná distribuce smykového napětí resp. disipované energie v míchané vsádce. Doba potřebná pro homogenizaci vsádky v průběhu plnění od minimální hladiny (zatopené míchadlo) až po kritické plnění těsně pod spodní hranu horní narážky roste až na dvojnásobek (viz tab. 3, resp. obr. 6), což ilustruje právě nerovnoměrnou distribuci disipované energie při různé úrovni plnění. Zlepšení homogenity lze dosáhnout již výše doporučenou instalací dvojice narážek s úhlem sklonu 90° do spodní části reaktoru tak, aby jejich spodní hrana dosahovala co nejbližší k anuloidovému přechodu mezi klenutým dnem a válcovým pláštěm reaktoru.

Tato konstrukční úprava zajistí nejen rovnoměrnější rozložení disipace energie v míchané, ale má za následek i zvýšení hodnoty měrného disipovaného příkonu.

Tabulka 7. Závislost měrného příkonu na úrovni plnění surovin v reaktoru R 40 při stávajícím stavu (bez spodních narážek) a pro navrženou úpravu (přidání spodních narážek).

RC 12, $n = 63 \text{ min}^{-1}$, horní narážky 60°				RC 25, $n = 70 \text{ min}^{-1}$, horní narážky 90°			
Plnění $m \text{ [t]}$	Příkon $P \text{ [kW]}$	Měrný příkon $\epsilon_m \text{ [W/t]}$		Plnění $m \text{ [t]}$	Příkon $P \text{ [kW]}$	Měrný příkon $\epsilon_m \text{ [W/t]}$	
		stávající stav	navržená úprava			stávající stav	navržená úprava
5,964	25,494	4275	6968	6,061	26,814	4424	7211
7,108	25,538	3593	5856	7,035	27,265	3876	6318
8,258	25,663	3107	5065	7,987	27,764	3476	5666
9,370	26,015	2776	4526	8,938	28,263	3162	5154
10,455	26,431	2528	4121	9,890	28,428	2874	4685
11,539	26,847	2327	3792	10,842	28,501	2629	4285
12,619	27,230	2158	3517	11,788	28,573	2424	3951
13,698	27,604	2015	3285	12,725	28,646	2251	3669
14,860	27,978	1883	3069	13,662	28,719	2102	3426
16,060	28,092	1749	2851	14,630	28,792	1968	3208
17,260	28,133	1630	2657	15,781	29,019	1839	2997
18,460	28,175	1526	2488	16,939	29,289	1729	2818
19,660	28,330	1441	2349	18,098	29,560	1633	2662
20,860	28,518	1367	2228	19,256	29,740	1544	2518
22,088	29,046	1315	2144	20,422	29,896	1464	2386
23,360	30,452	1304	2125	21,602	30,907	1431	2332
24,628	32,805	1332	2171	22,781	32,642	1433	2336
25,895	34,727	1341	2186	23,961	35,197	1469	2394
27,162	35,789	1318	2148	25,140	39,210	1560	2542
28,480	37,004	1299	2118	26,326	42,891	1629	2656
29,808	37,434	1256	2047	27,550	45,699	1659	2704
30,887	37,621	1218	1985	28,754	47,732	1660	2706
31,231	37,808	1211	1973	29,926	49,065	1640	2672
31,233	37,507	1201	1957	30,993	49,029	1582	2579
				31,417	49,680	1581	2578
				31,470	50,616	1608	2622
				31,470	49,695	1579	2574

Z provedených příkonových měření a z výsledků uvedených např. v [1] plyne, že hodnota příkonového čísla míchadla při kritickém plnění bez narážek je $Po = 0,4$. Po přidání spodních narážek se zvýší hodnota příkonového čísla na $Po = 0,65$. Navrženou konstrukční úpravou, tj.

přidáním spodních narážek, dojde ke zvýšení průměrné hodnoty měrného příkonu při plnění aparátu od minimální hladiny až po hladinu dosahující ke spodní hraně horní narážky o 60 ÷ 70 %. V tab. 7 je pro ilustraci znázorněná závislost průměrné hodnoty měrného příkonu vztaženého na jednu tunu dávkované suroviny pro dvě vybrané várky při obou možných hodnotách frekvence otáčení míchadla v reaktoru R 40. Hodnoty příkonu v průběhu plnění aparátu byly stanoveny z měření elektrických veličin dle rov. (10) uvedených spolu s dalšími měřenými parametry v zadavatelem dodaných provozních záznamech. Tato data byla dále doplněna o hodnoty měrného příkonu disipovaného do míchané vsádky vypočítaného dle výše uvedených parametrů pro stav, kdy bude reaktor vybaven navrženými spodními narážkami.

9. Závěry a doporučení

- Konstrukční úpravy míchaného reaktoru 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 reaktoru. Na základě těchto úvodních experimentů byla poté navržena konstrukční úprava míchaného reaktoru, pro 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 reaktoru. Minimální hladina odpovídala plnění do cca 25 % výšky reaktoru, tj. výška hladiny na modelu $H = 120$ mm, kdy bylo plně zatopeno míchadlo. Maximální výška hladiny odpovídala maximálnímu plnění, tj. výška hladiny na modelu $H = 415$ mm, kdy jsou plně zatopeny horní narážky. Z hlediska provozu je další kritickou úrovní plnění reaktoru stav, kdy míchadlo musí dispergovat a homogenizovat největší objem bez vlivu horních narážek. Tento stav nastává při výšce hladiny dosahující těsně pod spodní hranu horních narážek, čemuž odpovídá výška hladiny na modelu $H = 300$ mm.
- V první fázi práce byla experimentálně sledována homogenizace v míchané vsádce v reaktoru R 40 při stávající geometrii, tj. v nádobě bez spodních radiálních narážek. Při stávající konfiguraci dochází ke značně nerovnoměrné homogenizaci při různém plnění reaktoru. Při nejnepříznivější situaci plnění reaktoru těsně pod spodní hranu horních narážek, tj. míchadlo musí zajistit homogenizaci největšího objemu bez vlivu narážek, je třeba dvojnásobná doba homogenizace oproti minimální a maximální úrovni plnění reaktoru. Z těchto výsledků plyne, že současná konfigurace míchaného reaktoru není schopna zajistit rovnoměrnou dispergaci surovin i homogenizaci vsádky a to zejména při výše popsaném kritickém plnění.
- Pro zlepšení dispergace surovin a homogenizace v míchaném reaktoru je třeba provést takovou konstrukční úpravu, aby v celém objemu míchané vsádky převládal axiální tok, čehož lze dosáhnout instalací dvou radiálních narážek o šířce $b = 0,1D$ a výšce $a = 1/3D$ do spodní i horní části reaktoru (viz obr. 1). Homogenizace v nádobě se dvěma páry radiálních narážek je mnohem rovnoměrnější a dosahuje kratších homogenizačních časů oproti stávající konfiguraci reaktoru. Doporučený sklon spodních narážek je 90° . Z výsledků je zřejmé, že spodní narážky se sklonem 60° mají na rychlost homogenizace jen velmi malý vliv a míchání probíhá nerovnoměrně prakticky stejně jako v systému bez spodních narážek.
- Navržená konstrukční úprava, tj. instalace spodních narážek se sklonem 90° , zajistí nejen rovnoměrnější rozložení disipace energie v míchané, ale má za následek i zvýšení

hodnoty měrného disipovaného příkonu. Z provedených příkonových měření a z výsledků uvedených např. v [1] plyne, že hodnota příkonového čísla míchadla při kritickém plnění bez narážek je $Po = 0,4$. Po přidání spodních narážek se zvýší hodnota příkonového čísla na $Po = 0,65$. Navrženou konstrukční úpravou, tj. přidáním spodních narážek, dojde ke zvýšení průměrné hodnoty měrného příkonu při plnění aparátu od minimální hladiny až po hladinu dosahující ke spodní hraně horní narážky o $60 \div 70 \%$.

- Výrazné zlepšení homogenizace v navržené geometrické konfiguraci míchaného reaktoru se dvěma páry radiálních narážek bylo potvrzeno i experimenty s reálnou suspenzí PVC. Z výsledků plyne, že při variantách se dvěma páry narážek s úhlem sklonu spodních narážek 90° a úhly sklonu horních narážek 60° i 90° dochází k dostatečné homogenizaci suspenze při všech limitních stavech plnění. Nejrovnoměrnější homogenizace míchané suspenze PVC je však při variantě 2 x 2 narážky s úhlem sklonu $90^\circ / 90^\circ$.
- Pro zlepšení míchání v reaktoru R 40 doporučuji stávající horní narážky doplnit o spodní pár narážek o šířce $b = 0,1D$ a výšce $a = 1/3D$ se sklonem 90° . Tyto narážky umístít do hrdel N12 ve spodní části reaktoru. V případě reaktoru R 80 mohou být oba páry narážek o šířce $b = 0,1D$ a výšce $a = 1/3D$ se sklonem 90° umístěny dle stávajícího provedení nádoby aparátu. U obou reaktorů musí být sklon spodních narážek 90° . Sklon horních narážek lze volit v rozmezí $60^\circ \div 90^\circ$. Konečné nastavení sklonu horních narážek doporučuji zvolit empiricky stanovené jakosti produktu. Pro instalaci spodních narážek je dostatečná výkonová rezerva (minimální rezerva je 14 kW) na instalovaném elektromotoru při provozních otáčkách 63 min^{-1} , při provozních otáčkách 70 min^{-1} bude po konstrukční úpravě příkon na hranici instalovaného výkonu.
- Příkon na hřídeli míchadla, vyhodnocení příkonového čísla Po a měrného příkonu ε byly stanoveny z předaných provozních měření elektrických veličin na reaktoru R 40 při různých provozních režimech. Nejvyšší naměřený příkon motoru míchadla a příkonové číslo jsou uvedeny v tabulce 5. Interval nejvyšších hodnot měrného příkonu disipovaného do maximálního pracovního objemu vsádky při maximálním příkonu na hřídeli je $\varepsilon = 1360 \div 1640 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, což odpovídá intenzivnímu míchání.
- Geometrické uspořádání míchaného reaktoru R 80 vychází ze stávajícího stavu realizovaného tělesa aparátu a předané výkresové dokumentace. Provedené experimenty prokázaly, že pro optimální míchání vsádky v reaktoru je třeba do nádoby instalovat dva páry narážek. Narážky doporučuji ponechat ve stávajícím umístění v tělese reaktoru R 80. Geometrie a procesní charakteristiky míchadla byly přeneseny z experimentálního modelu i z hodnot naměřených v provozně ověřených stavech na menším reaktoru R 40. Navržené parametry reaktoru R 80 o vnitřním průměru $D = 3936 \text{ mm}$ jsou uvedeny v tabulce 6.
- Příkon na hřídeli míchadla reaktoru R 80 je $P = 131,2 \text{ kW}$. Instalovaný výkon elektromotoru je třeba navýšit o mechanickou účinnost pohonu, ztráty v uložení hřídele a ztráty v mechanických ucpávkách!

Seznam použitých symbolů a označení

a	výška narážek	[m]
b	šířka narážek	[m]
c_v	objemová kontrakce pevné fáze	[1]
D	průměr nádoby	[m]
d_1	průměr spodního míchadla	[m]
d_2	průměr horního míchadla	[m]
d_{32}	průměr dispergovaných částic dispergované kapaliny	[m]

H	výška hladiny	[m]
H_2	vzdálenost spodní hrany lopatek míchadla ode dna	[m]
H_3	umístění spodní narážky	[m]
H_4	Umístění horní narážky	[m]
h	šířka lopatky míchadla	[m]
m	hmotnost vsádky	[kg]
n	frekvence otáčení míchadla	[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	[m ³]
α	exponent v rov. (5)	[1]
ε	měrný příkon	[W·m ⁻³]
ε_m	měrný příkon	[W·kg ⁻¹]
μ_L	dynamická viskozita kapalné fáze	[Pa·s]
μ	dynamická viskozita suspenze	[Pa·s]
ρ	hustota suspenze PVC	[kg·m ⁻³]
ρ_c	hustota dispergované kapaliny	[kg·m ⁻³]
σ	Povrhové napětí dispergované kapaliny	[Pa]

Seznam použité literatury

- [1] Ceres, D., Jirout, T., Rieger, F. Mixing of suspensions with curved blade turbine. *Inžynieria i Aparatura Chemiczna*, roč. 50, č. 1, 2011. s. 7-8. ISSN 0368-0827.
- [2] Rieger, F., Novák, V., Jirout, T.: *Hydromechanické procesy II*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. 167 s. ISBN 80-01-03302-3.
- [3] Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., Kresta, S. M.: *Handbook of industrial mixing: science and practice*. Canada: Wiley-Interscience, 2003, 1377 s.
- [4] Jirout, T., Rieger, F.: *Scale-up of Mixing Equipment for Suspensions*. Chemical and Process Engineering - Inžynieria Chemiczna i Procesowa. 2009, vol. 30, no. 3, p. 359-367. ISSN 0208-6425.
- [5] Rieger, F., Ditl, P., Novák, V. Vortex Depth in Mixed Unbaffled Vessels. *Chemical Engineering Science*, 1979, vol. 34, p. 397-403.
- [6] Chong, J. S., Christiansen, E. B., Baer, A. D. Rheology of concentrated suspensions. *Journal of Applied Polymer Science*, 1971, vol. 15, p. 2007-2021.
- [7] Ambroz, F.: Statistické zpracování experimentálních dat. Výukový text, ČVUT, 2011. s. 32.