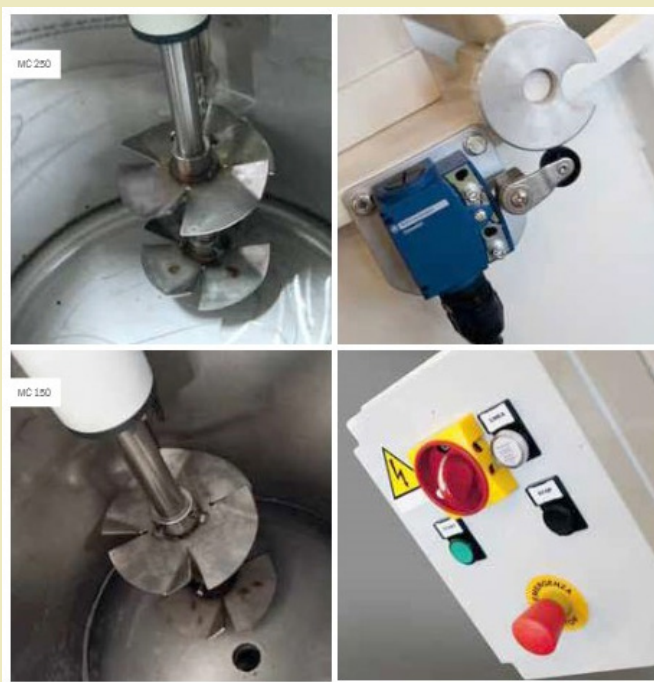




*Izabela Miturska-Barańska*

# Mieszanie wieloskładnikowych kompozycji klejowych



M  
O  
N  
O  
G  
R  
A  
F  
I  
E

# Mieszanie wieloskładnikowych kompozycji klejowych

# Monografie – Politechnika Lubelska

## Rada Naukowa Wydawnictwa Politechniki Lubelskiej

**Przewodnicząca:**  
Agnieszka RZEPKA

**Dyrektor CIN-T:**  
Katarzyna WEINPER

### **Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej:**

Magdalena CHOŁOJCZYK  
Jarosław GAJDA  
Anna KOŁTUNOWSKA  
Katarzyna PEŁKA-SMĘTEK

### **Przedstawiciele Dyscyplin Naukowych Politechniki Lubelskiej:**

Marzenna DUDZIŃSKA  
Małgorzata FRANUS  
Arkadiusz GOLA  
Paweł KARCZMAREK  
Beata KOWALSKA  
Anna KUCZMASZEWSKA  
Jarosław LATAŁSKI  
Tomasz LIPECKI  
Zbigniew ŁAGODOWSKI  
Joanna PAWŁAT  
Lucjan PAWŁOWSKI  
Natalia PRZESMYCKA  
Magdalena RZEMIENIAK  
Mariusz ŚNIADKOWSKI

### **Przedstawiciele honorowi:**

Zhihong CAO, Chiny  
Miroslav GEJDOŚ, Słowacja  
Karol HENSEL, Słowacja  
Hrvoje KOZMAR, Chorwacja  
Frantisek KRCMA, Czechy  
Sergio Lujan MORA, Hiszpania  
Dilbar MUKHAMEDOVA, Uzbekistan  
Sirgii PAWŁOW, Ukraina  
Natalia SAVINA, Ukraina  
Natia SHENGELIA, Gruzja  
Daniele ZULLI, Włochy

Izabela Miturska-Barańska

# Mieszanie wieloskładnikowych kompozycji klejowych



POLITECHNIKA  
LUBELSKA  
WYDAWNICTWO

Lublin 2022

Recenzenci:

dr hab. inż. Katarzyna Antosz, prof. uczelni, Politechnika Rzeszowska

Dr hab. inż. Aneta Krzyżak, prof. uczelni, Lotnicza Akademia Wojskowa

Wydanie monografii zostało sfinansowane z Projektu Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na podstawie umowy nr 030/RID/2018/19

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2022

ISBN: 978-83-7947-545-2

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

[www.wpl.pollub.pl](http://www.wpl.pollub.pl)

ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59

Druk: Drukarnia Akapit Sp. z o. o.

[www.drukarniaakapit.pl](http://www.drukarniaakapit.pl)

---

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL [www.bc.pollub.pl](http://www.bc.pollub.pl)

Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)

Nakład: 50 egz.

# Spis treści

Streszczenie .....	7
Wykaz najważniejszych skrótów i symboli .....	9
1. Wprowadzenie .....	11
2. Podstawowe zagadnienia w procesie mieszania i definicje .....	13
3. Przegląd podstawowych typów mieszalników .....	21
3.1. Mieszadła .....	22
3.1.1. Mieszadła mechaniczne.....	22
3.1.2. Mieszadła przepływowe.....	42
3.1.3. Mieszadła ultradźwiękowe.....	48
3.1.4. Mieszadła magnetyczne .....	50
3.2. Mieszalniki.....	53
3.2.1. Mieszalniki mechaniczne .....	54
3.2.2. Mieszalniki przepływowe .....	58
3.2.3. Mieszalniki ultradźwiękowe .....	63
3.3. Zbiorniki mieszalników .....	67
4. Napędy mieszalników.....	76
4.1. Wał mieszadła .....	76
4.2. Łączenie wałów.....	77
4.3. Łożyskowanie i uszczelnienia wałów .....	78
4.4. Przekładnie.....	80
4.5. Silniki napędowe.....	81
4.6. Hermetyczne układy napędowe .....	83
5. Wpływ parametrów geometrycznych mieszalnika na moc mieszadeł.....	85
5.1. Wpływ parametrów geometrycznych mieszalnika na moc mieszadeł turbinowych .....	85
5.2. Wpływ parametrów geometrycznych mieszalnika na moc mieszadeł śmigłowych i ślimakowych.....	89
5.3. Wpływ parametrów geometrycznych mieszalnika na moc mieszadeł łopowych .....	90
6. Wymiana ciepła w mieszalnikach.....	92

7. Przykłady wpływu rodzaju mieszadła na właściwości kleju .....	95
8. Zakończenie .....	108
Literatura.....	109

# Mieszanie wieloskładnikowych kompozycji klejowych

## **Streszczenie**

Właściwości eksploatacyjne klejów konstrukcyjnych istotnie zależą od sposobu przygotowania kompozycji klejowej. Procedura przygotowania kleju ma bezpośredni wpływ na stopień dyspersji składników kompozycji w matrycy, a ostatecznie również wpływa na właściwości fizyczne i użytkowe samego kleju. Sposób przygotowania kleju zależy głównie od jego postaci i ilości tworzących go składników. Proces mieszania klejów wieloskładnikowych przebiega zwykle przy wykorzystaniu specjalnego oprzyrządowania i stanowisk do tego przystosowanych. W niniejszej pracy podano pojęcia podstawowe i definicje mieszania. Scharakteryzowano zagadnienia związane z procesem mieszania. Opisano podstawowe typy mieszalników i mieszadeł oraz dokonano przeglądu zbiorników mieszalników. Zawarto informacje dotyczące napędów mieszalników. Zamieszczono również opis wpływu parametrów geometrycznych mieszalnika na moc wybranych rodzajów mieszadeł. Przedstawiono także przykłady wpływu rodzaju mieszadła na właściwości kleju.

## **Słowa kluczowe:**

Mieszanie, mieszadło, mieszalnik, kompozycje klejowe



# Mixing of multi-component adhesive compositions

## **Abstract**

The performance properties of structural adhesives significantly depend on how the adhesive composition is prepared. The adhesive preparation procedure has a direct effect on the degree of dispersion of the composition components in the matrix, and ultimately also affects the physical and performance properties of the adhesive. The method of preparing an adhesive depends mainly on its form and the quantity of its components. The mixing process of multi-component adhesives is usually carried out using special instrumentation and workstations designed for this purpose. In this work, basic concepts and definitions of mixing are given. Issues related to the mixing process are characterized. The basic types of mixers and agitators are described and mixer vessels are reviewed. Information on mixer drives is included. A description of the influence of geometrical parameters of the mixer on the output of selected mixer types is also included. Examples of the influence of mixer type on adhesive properties are also presented.

## **Keywords:**

Mixing process, agitator, mixer, adhesive compositions

## Wykaz najważniejszych skrótów i symboli

$\alpha$	– współczynnik wnikania ciepła
$\eta$	– lepkość cieczy
$\rho$	– gęstość cieczy
$\sigma$	– napięcie powierzchniowe
$\tau$	– czas procesu mieszania
$\tau_k$	– czas końca procesu mieszania
$a$	– szerokość łopatek mieszadła
$b$	– wysokość łopatek mieszadła
$B$	– szerokość przegrody zbiornika mieszalnika
$c_i, c_o, c_k$	– stężenie charakteryzujące badany układ mieszania
$d$	– średnica mieszadła
$D$	– średnica zbiornika mieszadła
$e'$	– pochylenie mieszadła
$E$	– liczba sekcji mieszających
$Fr$	– zastępcza liczba Froude'a
$g$	– przyspieszenie ziemskie
$h$	– wysokość zawieszenia mieszadła od dna zbiornika
$H$	– wysokość cieczy w zbiorniku mieszadła
$J$	– liczba przegród w zbiorniku mieszalnika
$L$	– długość/wysokość przegród zbiornika mieszadła
$n$	– częstość obrotów mieszadła / liczba próbek
$N$	– liczba strumieni
$Ne$	– liczba mocy / zmodyfikowana liczba Newtona / zmodyfikowana liczba Eulera
$mPas$	– miliPaskal sekunda
$P$	– moc mieszania
$Re$	– zastępcza liczba Reynoldsa

- u – prędkość obwodowa końca łopatek mieszadła
- w – prędkość mieszania
- $\bar{w}$  – prędkość średnia mieszania
- We – zastępcza liczba Webera
- $V_c$  – objętość cieczy w mieszalniku
- Z – liczba łopatek mieszadła

# 1. Wprowadzenie

Procedura przygotowania kompozycji klejowych ma bezpośredni wpływ na stopień dyspersji składników kompozycji w matrycy, jak również na stopień napowietrzenia powstałej kompozycji. Od tych parametrów zależą właściwości wytrzymałościowe i użytkowe materiału końcowego, dlatego też odpowiednie zmieszanie składników kleju odgrywa decydującą rolę w procesie klejenie [6, 12, 23].

Sposób przygotowania kleju zależy głównie od jego postaci. Ze względu na stan skupienia wyróżnia się kleje stałe, półpłynne oraz ciekłe. Kleje stałe występują najczęściej w postaci jednoskładnikowej i są gotowe do bezpośredniego użycia [10]. Kleje konstrukcyjne występujące w postaci stałej lub ciekłej stanowią zwykle dwu lub więcej składnikowe kompozycje, których składniki powinny być zmieszane na jednorodną substancję, aby w pełni spełniały swoje funkcje. W przypadku klejów dwuskładnikowych, należy zwrócić uwagę na to, aby wszystkie jego składniki (dodane w odpowiednich ilościach, często wynikających ze stosunków stechiometrycznych niektórych składników) odpowiednio się połączyły, tworząc jednorodną mieszaninę kleju [3, 12, 19]. Należy również zwrócić uwagę na to, aby w kompozycji klejowej nie wystąpiły pęcherze powietrza, ponieważ jest to zjawisko niepożądane i może być przyczyną niedoklejen łączy materiałów, a także może wpływać na wytrzymałość połączenia klejowego [35, 50]. Do składnika podstawowego, niejednokrotnie wymagane są substancje pomocnicze, takie jak np. rozpuszczalniki, aktywatory lub katalizatory procesu sieciowania, utwardzacze oraz inne składniki dodatkowe. Niejednokrotnie zdarza się, że składnikami kompozycji klejowych wieloskładnikowych są dodatki modyfikujące, zwane napełniaczami lub modyfikatorami. Częsteczki pierwotne napełniacza w formie niezaglomerowanej występują w warunkach rzeczywistych niezmiernie rzadko. Na skutek wiązania ich siłami wzajemnego oddziaływania fizykochemicznego w ilości kilku, kilkunastu cząstek pierwotnych tworzy agregat. Skupisko kilku lub kilkunastu agregatów powiązanych siłami wzajemnego oddziaływania fizycznego lub chemicznego tworzy aglomerat. Występowanie aglomeratów nanocząstek w matrycy może powodować powstawanie wad, które skutkują redukcją właściwości zmodyfikowanego polimeru, dlatego też istotny jest dobór odpowiedniej metody mieszania kompozycji klejowej, która umożliwi uzyskać wymaganą dyspersję nanocząstek oraz właściwego ich zwilżenia przez materiał matrycy [8, 51, 52]. W operacji mieszania wykorzystywane są zarówno metody ręczne, jak i mechaniczne, stosując odpowiednie przyrządy i urządzenia. W przypadku różnego typu produkcji (jednostkowej lub seryjnej) proces ten może zostać zautomatyzowany, stosując odpowiednie przyrządy, narzędzia lub urządzenia [6, 40, 67].

Proces mieszania klejów wieloskładnikowych przebiega zwykle przy wykorzystaniu specjalnego oprzyrządowania i stanowisk do tego przystosowanych

[26, 66]. Obecnie znanych jest wiele odmian konstrukcyjnych mieszalników. Różnorodność ta jest znacznie większa niż w przypadku innych urządzeń stosowanych w technologii klejenia, ponieważ o budowie mieszalnika decyduje nie tylko rodzaj mieszadła, ale również typ zbiornika mieszalnika. Należy również mieć na względzie parametry reologiczne mieszanych materiałów. Mieszadła mogą być wbudowywane do zbiorników o różnych kształtach, co przyczynia się do zwiększenia liczby przypadków konstrukcyjnych mieszalników [32]. Konstrukcja samego mieszadła odgrywa bez wątpienia najważniejszą rolę w pracy mieszalnika, niemniej również i rodzaj zbiornika może mieć istotny wpływ na jego pracę.

Wybór odpowiedniej konstrukcji mieszadła czy mieszalnika zapewnia właściwą efektywność mieszania. Wybór mieszadła zależy nie tylko od typu procesu, ale także od typu składnika bazowego, a właściwie jego właściwości – głównie lepkości oraz rodzaju i reologii wszystkich składników użytych do produkcji [32, 62]. Należy również mieć na uwadze, że wiele produktów posiada skrajnie różne wymagania procesowe jak np. wysoka dyspersja dla produktów o znacznym pienieniu. Do tego dochodzą problematyczne często kwestie wymiany ciepła czy też wymiany gazów w procesach napowietrzania lub inertyzacji. Kolejny problem może stanowić wrażliwość produktu, np. na obróbkę mechaniczną. Trzeba bowiem wziąć pod uwagę, że mieszana substancja może być wrażliwa np. na naprężenia ścinające, które generowane są przez obracające się mieszadło oraz będące wynikiem wysokiej lepkości materiału [62]. Nie należy zapominać o aspektach praktycznych, np. o możliwości mycia i łatwości utrzymania w stanie użyteczności. Ma to bowiem kluczowe znaczenie dla jakości i bezpieczeństwa gotowego produktu. Należy również nadmienić, że mieszanie to bardzo energochłonny proces. Aby zminimalizować ilość potrzebnej energii, ważne jest prawidłowe dobranie typu mieszadła oraz intensywności i mocy mieszania. Właściwą intensywność mieszania można z kolei zapewnić dobierając właściwy napęd oraz prędkość pracy poszczególnych elementów mieszających [78].

W niniejszej pracy podano pojęcia podstawowe i definicje mieszania. Scharakteryzowano zagadnienia związane z procesem mieszania. Opisano podstawowe typy mieszalników i jego składowych, czyli mieszadeł i zbiorników. Zawarto informacje dotyczące napędów mieszalników. Zamieszczono również opis wpływu parametrów geometrycznych mieszalnika na moc wybranych rodzajów mieszadeł oraz załączono wykresy będące podstawą do obliczania mocy mieszania cieczy. Przedstawiono przykłady wpływu rodzaju mieszadła na właściwości kleju.

## 2. Podstawowe zagadnienia w procesie mieszania i definicje

Z procesem mieszania, jak z resztą z każdym procesem związany jest szereg podstawowych pojęć i definicji. Najważniejsze przedstawiono poniżej.

*Mieszanie* jest procesem bardzo rozpowszechnionym w wielu gałęziach przemysłu [5, 16]. Mieszanie może więc zachodzić zarówno w rurociągu, przez który przepływa płyn, w pompie przetłaczającej, na półce kolumny rektyfikacyjnej, jak również w aparatach przeznaczonych specjalnie do tego celu, tzw. mieszalnikach. Mieszanie może przebiegać samorzutnie, np. dzięki dyfuzji składników układu, bądź też w sposób wymuszony wskutek doprowadzenia do układu z zewnątrz energii mechanicznej, np. za pomocą mieszadeł.

Słowo mieszanie ma wielorakie znaczenie, ponieważ może prowadzić do korzystnych, jak i niekorzystnych skutków. Najogólniej słowo mieszanie oznacza wzajemne przemieszczanie się różnych cząstek danego ośrodka w celu uzyskania lub trzymania jego jednorodności. W aspekcie procesowym mieszanie można zdefiniować jako proces jednostkowy, polegający na uzyskaniu jednorodności w środowisku jedno- lub wielofazowym, pod względem stężenia, gęstości, temperatury i innych właściwości mieszaniny [39, 41, 56]. Jest to sposób zwiększenia intensyfikacji procesów wymiany ciepła, wymiany masy oraz przyspieszenia reakcji.

Celem procesu mieszania jest:

- otrzymanie jednorodnych roztworów, emulsji i zawiesin,
- intensyfikacja procesów wymiany ciepła,
- intensyfikacja procesów wymiany masy.

Celem zoptymalizowania mieszania jest uzyskanie wymaganego stopnia zmieszania w krótkim czasie i przy jak najmniejszym nakładzie energii [41].

*Mieszadło* jest to urządzenie stosowane w procesie mieszania. Konstrukcja mieszadła odgrywa niewątpliwie najważniejszą rolę w procesie mieszania. Mieszadło może być traktowane jako samodzielne, autonomiczne urządzenia, jak również wbudowane do zbiornika stanowiąc całościowe urządzenie zwane mieszalnikiem [22, 56, 62]. Podział mieszadeł zwykle jest umowny i zależy od przyjętego kryterium podziału, co zostało opisane w dalszej części pracy.

*Mieszalnik* jest to zbiornik wyposażony w mieszadło, w którym następuje mieszanie różnych substancji.

*Moc mieszania  $P$*  jest to energia przekazana cieczy mieszanej w jednostce czasu za pomocą mieszadła oraz zużytkowana na wywołanie wirów w cieczy, która ostatecznie zamienia się w ciepło. Na moc mieszania mają wpływ różne parametry układu. Wśród nich można wyróżnić [39, 41]:

- parametry fizyczne układu: gęstość  $\rho_L$ , lepkość  $\eta_L$ ,

- parametry kinetyczne i dynamiczne układu: częstość obrotów mieszadła  $n$ , przyspieszenie ziemskie  $g$ ,
- parametry geometryczne mieszadła i zbiornika: średnica mieszadła  $d$ , średnica zbiornika  $D$ , wysokość słupa cieczy w zbiorniku  $H$ , odległość mieszadła od dna zbiornika  $h$ , długość/wysokość przegród  $L$ , szerokość przegród  $B$ , wysokość łopatek  $b$ , szerokość łopatek  $a$ .

*Stopień zmieszania*  $I$  najogólniej rozumieć należy jako stosunek rozpraważenia wzajemnego dwu lub więcej substancji do stanu rozpraważenia idealnego, osiągniętego po doskonałym zmieszaniu układu [32, 41]. Stopień zmieszania określający ilościowo jednorodność mieszaniny jest więc pewnego rodzaju miarą efektu mieszania, zaś jego zmiany mogą być wykorzystywane do oceny intensywności mieszania. Jednorodność układu, czy inaczej indeks mieszania wynikający ze stopnia zmieszania można wyznaczyć dzięki prostej zależności:

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{c_i - c_0}{c_k - c_0} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$n$  – liczba pobranych próbek,

$c_i, c_0, c_k$  – stężenie lub inna cecha charakteryzująca badany układ odpowiednio dla czasów  $\tau, \tau=0$ , oraz dla końca procesu mieszania  $\tau_k$ .

*Intensywność mieszania* określana jest przy pomocy takich wielkości, jak:

- a) częstość obrotów mieszadła  $n$ ,
- b) prędkość obwodowa końca łopatek mieszadła  $u$ ,
- c) zastępcza liczba Reynoldsa dla procesów mieszania  $Re$ ,
- d) moc mieszania, liczona na jednostkę objętości mieszanej cieczy lub na jednostkę masy mieszanej cieczy.

Każda z powyższych wielkości jest odpowiednią miarą intensywności mieszania dla konkretnego mieszalnika pracującego w konkretnym układzie [32, 41]. Znalezienie uniwersalnego kryterium intensywności mieszania jest jednym z najtrudniejszych zagadnień techniki mieszania, którego nie rozwiązano pomimo wielu prac prowadzonych w tym kierunku [24, 28, 44, 47]. Brak takiego kryterium uniemożliwia opisanie uniwersalnymi równaniami takich procesów, jak wnikanie ciepła, wnikanie masy, itp. Konieczne jest więc zadowolenie się indywidualnymi równaniami dla poszczególnych mieszalników.

*Efektywność mieszania* określa, przy jakim nakładzie energii jest możliwe osiągnięcieżądanego efektu technologicznego [56]. Tak więc z dwu mieszalników ten pracuje bardziej efektywnie, w którym osiąga się określony efekt technologiczny przy niższym nakładzie energii. Efektywność mieszania jest również podstawą do oceny pracy tego samego mieszalnika (dla wyboru optymalnych warunków jego pracy, jak również optymalnych jego rozmiarów). Aby jednak móc obliczać efektywność mieszania, konieczna jest znajomość równań opisują-

cych moc mieszania, przenikanie ciepła, wnikanie masy, itd., nie tylko dla układów standardowych, ale również przy zmiennych parametrach geometrycznych układu.

Efektywność mieszania może być wyznaczana z kilku zależności przedstawionych poniżej [62, 75]:

- zależność pomiędzy stosunkiem indeksu mieszania do mocy mieszania, a liczbą obrotów mieszadła:

$$\frac{l}{N} = f(n) \quad (2)$$

- zależności między indeksem mieszania a mocą zużywaną na jednostkę objętości mieszanego układu:

$$l = f\left(\frac{N}{V}\right) \quad (3)$$

- zależności między indeksem mieszania a nakładem energii zużywanym na jednostkę objętości mieszanego układu:

$$l = f\left(\frac{N\tau}{V}\right) \quad (4)$$

Zagadnienie efektywności mieszania zyskuje coraz większe znaczenie.

Właściwości kompozycji klejowych, zależą od jej składu, sposobu mieszania oraz wzajemnego oddziaływania składników. Wymienione czynniki mogą decydować o stopniu mikroheterogeniczności kompozycji. Przyczynami niejednorodności właściwości kompozycji klejowych mogą być:

- niemieszalność termodynamiczna składników, która uniemożliwia ich zmieszanie na poziomie cząsteczkowym [29, 45, 61],
- znaczna różnica lepkości, która uniemożliwia lub istotnie utrudnia uformowanie jednorodnej struktury mieszaniny podczas mieszania [4],
- znaczna różnica szybkości sieciowania składników kompozycji [56].

Z uwagi na to, że punktu widzenia termodynamiki kleje w stanie nie utwardzonym są płynami, można zdefiniować ich mieszalność termodynamiczną jako zdolność tworzenia stabilnego układu jednofazowego przy dowolnym stosunku ilościowym składników [20, 68]. Praktyczną miarą mieszalności jest zmniejszenie energii swobodnej ( $\Delta F < 0$ ) przy stałej objętości, a przy stałym ciśnieniu – zmniejszenie entalpii swobodnej ( $\Delta_M G < 0$ ) [30]. Dla uzyskania jednofazowej mieszaniny musi być spełniony także warunek:  $(\partial^2 \Delta_M G / \partial \varphi^2)_{p,T} > 0$ , gdzie  $\varphi$  oznacza ułamek objętościowy składnika w mieszaninie [41]. Wówczas zmiana potencjału układu  $\Delta_M G$  jest określona zmianą entalpii  $\Delta_M H$ , entropii  $\Delta_M S$  i temperaturą  $T$ , zgodnie z zależnością:



$$\Delta_M G = \Delta_M H - T \Delta_M S \quad (5)$$

Entropia mieszania może być wyrażona przez prawdopodobieństwo rozmieszczenia w przestrzeni składników przed ich zmieszaniem [85]. Jeśli wartość  $\Delta_M H$  jest niska, to iloczyn  $T \Delta_M S$  jest miernikiem samorzutnego zmieszania składników [48, 76].

Samorzutne zmieszanie dwóch lub więcej składników kompozycji klejowej jest procesem, wskutek którego układ przechodzi ze stanu uporządkowanego w stan o losowym ich rozmieszczeniu. Mieszalność zachodzi, gdy jest spełniony jeden z następujących warunków [30, 46, 55, 81]:

1.  $\Delta_M H < 0$  i  $\Delta_M S > 0$  – rozpuszczanie egzotermiczne, któremu towarzyszy wzrost entropii; wtedy energia oddziaływania pomiędzy cząsteczkami różnych substancji jest większa niż pomiędzy cząsteczkami jednej substancji;
2.  $\Delta_M H < 0$  i  $\Delta_M S < 0$  pod warunkiem, że  $|\Delta_M H| > |T \Delta_M S|$  – rozpuszczanie egzotermiczne, któremu towarzyszy zmniejszenie entropii zdarzające się, np. podczas rozpuszczania substancji polarnych w polarnych rozpuszczalnikach;
3.  $\Delta_M H < 0$  i  $\Delta_M S > 0$  pod warunkiem, że  $|\Delta_M H| < |T \Delta_M S|$  – rozpuszczanie endotermiczne, któremu towarzyszy zwiększenie entropii, występujące często w rozpuszczalnikach niepolarnych;
4.  $\Delta_M H = 0$  i  $\Delta_M S > 0$  – rozpuszczanie atermiczne, któremu towarzyszy zwiększenie entropii.

Ważnym aspektem w procesie mieszania są także występujące efekty cieplne. Zmiana temperatury substancji podczas mieszania jest spowodowana różnicą pomiędzy energią doprowadzoną do układu (lub odprowadzoną) a intensywnością dyssypacyjnego rozgrzewania się składników kompozycji. Zazwyczaj podczas mieszania dąży się do utrzymania stałej temperatury wyjściowej, aby uniknąć przegrzania kompozycji i jej przyspieszonego sieciowania w skutek oddziaływania procesów termicznych. Dlatego też wartość tej temperatury nie jest wielkością jednoznacznie określaną, gdyż stanowi ona kompromis pomiędzy wymaganiami efektywności dyspergowania składników, a wydajnością mieszania. Dla płynów nienewtonowskich, do jakich zaliczyć można kleje, w warunkach ścinania prostego jednostkowa energia dysypacji  $E_d$  wyrażana jest wzorem [2, 7]:

$$E_d = m \left( \frac{\dot{\gamma}}{t} \right)^{n+1} \quad (6)$$

gdzie  $m$  i  $n$  stanowią stałe materiałowe.

Przyrost temperatury substancji można obliczyć z zależności:

$$\Delta T = \frac{E_d}{CM} \quad (7)$$

gdzie:

$M$  – masa mieszanych substancji,

$C$  – ciepło właściwe.

Podwyższenie temperatury mieszanych substancji pozwala zmniejszyć ich lepkość. Wówczas homogenizacja i jednorodność mieszanych substancji jest uzyskiwana w krótszym czasie, a stopień zmieszania składników jest wyższy.

Analizując procesy związane z mieszaniem kompozycji klejowych nie można pominąć jeszcze kilku ważnych zagadnień, a dokładnie tych związanych z prędkością substancji w mieszalnikach, która wiąże się z geometrią mieszadła oraz prędkością obrotową "w". Jednak w przypadku procesów realizowanych w mieszalnikach cieczy, trudno jest zdefiniować liczby kryterialne, w których występuje prędkość substancji w mieszalniku  $w$ . Rozkład prędkości w mieszalnikach jest bardzo skomplikowany i nie można posłużyć się w tym przypadku prędkością średnią  $\bar{w}$ , jak np. przy przepływie cieczy w rurze. Ogólnie: prędkość zależy również od wzrostu temperatury, z powodu dużych naprężeń ścinających i dyspergowania składników, co z kolei odzwierciedla się w tzw. mieszalności termodynamicznej [62, 75]. Zdefiniowanie liczb kryterialnych, które nie zawierają prędkości  $w$ , nie jest trudne i nie różnią się one od tradycyjnych ujęć.

Ważniejszymi liczbami kryterialnymi dla procesu mieszania są [79]:

- liczba Reynoldsa,
- liczba Freude'a,
- liczba mocy,
- liczba Webera.

Poniżej omówiona zostanie każda z wymienionych liczb.

*Liczba Reynoldsa* jest to bezwymiarowa liczba używana do badania układów płynów na różne sposoby, takie jak schemat przepływu płynu, charakter przepływu i różne parametry mechaniki płynów [69, 71]. Fizykalnie moduł ten przedstawia stosunek sił bezwładności do sił tarcia wewnętrznego, ponadto stanowi kryterium określające charakter przepływu. Obszar  $Re = 2\ 100 - 3\ 000$  (tzw. obszar przejściowy) rozgranicza przepływ uwarstwiony ( $Re < 2\ 100$ ) od przepływu burzliwego ( $Re > 3\ 000$ ).

Dla przepływu cieczy w mieszalnikach przyjmuje się umownie  $\bar{w} = \pi dn$  oraz  $d_o = d$  (średnica mieszadła), wówczas po pominięciu mnożnika  $\pi = 3,14$  jako wartości stałej, otrzymuje się zastępczą wartość liczby Reynoldsa:

$$Re = \frac{nd^2\rho}{\eta} \quad (8)$$

Tak zdefiniowana liczba Reynoldsa nie stanowi już uniwersalnego kryterium określającego charakter przepływu, ponieważ przepływ ten zależy dodatkowo od konstrukcji mieszalnika (mieszadła i zbiornika), co nie jest uwidocznione we wzorze (5). Jest to zasadniczą wadą tej definicji, gdyż stanowi przeszkodę w uniwersalnym ujęciu wielu procesów realizowanych w mieszalnikach. Dlatego też dla każdego mieszadła są opracowywane oddzielne wzory na moc mieszania, wnikanie ciepła, itd.

Obszar przejściowy, w którym przepływ cieczy w mieszalniku zmienia się z uwarstwionego (laminarnego) na burzliwy (turbulentny), jest znacznie szerszy niż dla przepływu cieczy np. w rurach i leży w granicach  $Re = 10 - 10^4$ . Są jednak mieszalniki dla których obszar burzliwy zaczyna się już przy  $Re = 10^3$ , jak również dla innych obszar uwarstwiony osiąga  $Re = 10^2$ .

W ruchu laminarnym elementy płynu poruszają się po torach prostych lub łagodnie zakrzywionych, w zależności od kształtu ścian, które nadają kształt wszystkim liniom prądu. Sprawia to wrażenie, jakby płyn poruszał się warstwami, między którymi nie odbywa się wymiana płynu (stąd nazwa przepływ uwarstwiony). W rzeczywistości wymiana taka nie odbywa się w skali makroskopowej, ale wiadomo, że poszczególne molekuly płynu wykonują beładny ruch, dzięki któremu zmieniają swoje położenie (dyfuzja molekularna). Stąd w ruchu laminarnym mamy do czynienia z wymianą masy, a z nią i pędu w skali mikroskopowej. Jest to przyczyną występowania naprężeń stycznych.

Większość występujących w przyrodzie i interesujących pod względem technicznym typów przepływów stanowią przepływy turbulentne. Najbardziej znamienne i dominującą cechą tych przepływów jest chaotyczny i nieregularny ruch elementów płynu. Wskutek tego wszystkie wielkości, charakteryzujące dany przepływ, wykazują zmienność zarówno w czasie, jak i w przestrzeni. Elementy płynu przemieszczają się zgodnie z głównym kierunkiem przepływu, wykonując równocześnie nieuporządkowane ruchy fluktuacyjne. Są to ruchy poprzeczne w stosunku do kierunku przepływu. Wywołują one wymianę masy i pędu między poszczególnymi warstwami. Turbulencja jest zatem zjawiskiem charakteryzującym się występowaniem w przepływającym płynie chaotycznych fluktuacji parametrów hydro i termodynamicznych (prędkości przepływu, ciśnienia, gęstości, temperatury). Przejście ruchu laminarnego w turbulentny następuje wskutek utraty stateczności przepływu laminarnego [69, 86].

Wzajemna relacja sił bezwładności i sił lepkości w przepływie płynu, wyrażona przez liczbę Reynoldsa, silnie wpływa na charakter przepływu. Przy niskich wartościach liczby Reynoldsa, czyli przy relatywnie dużych siłach lepkości, przepływ ma charakter uporządkowany – elementy płynu poruszają się po torach równoległych i nie dochodzi do ich wzajemnego mieszania się, czyli przepływ uwarstwiony. Powyżej pewnej wartości liczby Reynoldsa (zwanej

dolną liczbą krytyczną), na skutek rosnącej roli sił bezwładności przepływ taki traci stateczność i pojawiają się w nim zaburzenia charakteryzujące się stochastycznymi fluktuacjami prędkości. Przy dalszym wzroście liczby Reynoldsa (powyżej tzw. górnej wartości krytycznej) zaburzenia obejmują cały przepływ (przepływ burzliwy). Wartości krytyczne liczby Reynoldsa są różne dla różnych przepływów, np. inne dla przepływu w rurze, a inne dla opływu płaskiej ściany.

Sprawdzeniem przejścia przepływu uwarstwionego w burzliwy jest analiza wykresów przebiegu różnych zależności, np. charakterystyk mocy mieszania, które zostały przedstawione w rozdziale 5. Na ogół we współrzędnych logarytmicznych otrzymuje się proste dla  $Re < 10$ , krzywe w zakresie  $Re = 10 - 10^4$  oraz ponownie proste dla  $Re > 10^4$ . W literaturze można spotkać również inne propozycje ujęcia liczby Reynoldsa dla procesów mieszania.

*Liczba Froude'a* jest bezwymiarowym parametrem mierzącym stosunek siły bezwładności działającej na element płynu do ciężaru tego elementu płynu [72, 86]. Jak powyżej wspomniano, dla procesów realizowanych w mieszalnikach przyjmuje się  $w = \pi dn$  oraz  $l = d$ . Po opuszczeniu mnożnika  $\pi$  uzyskuje się zastępczą liczbę Froude'a, która ma postać:

$$Fr = \frac{n^2 d}{g} \quad (9)$$

Liczba ta ujmuje wpływ zawirowania cieczy (czyli tworzenia się leja w mieszalniku) na moc mieszania oraz niektóre procesy realizowane w takim urządzeniu. Jeżeli zbiornik mieszalnika jest wyposażony w przegrody utrudniające zawirowania cieczy, liczba Froude'a nie odgrywa żadnej roli w procesie [69, 86].

*Liczba mocy* nazywana również *zmodyfikowaną liczbą Newtona* lub *zmodyfikowaną liczbą Eulera* jest to bezwymiarowa liczba używana w mechanice płynów i inżynierii procesowej do scharakteryzowania warunków mechanicznego mieszania cieczy [21, 59, 86].

Wychodząc z definicji liczby Newtona  $Ne = (\text{siła} \cdot \text{czas}) / (\text{masa} \cdot \text{prędkość})$  oraz przyjmując proporcjonalności uzyskuje się zmodyfikowaną liczbę Newtona będącą liczbą mocy i mającą postać:

$$Ne = \frac{P}{n^3 d^5 \rho} \quad (10)$$

Identyczny wzór można otrzymać wychodząc z definicji liczby Eulera i przyjmując pewne założenia proporcjonalności.

Liczba mocy ujmuje w pewien sposób doskonałość zamiany włożonej do układu pracy na energię kinetyczną. Mniejsza wartość liczby mocy oznacza

bardziej ekonomiczną zamianę włożonej pracy na energię kinetyczną cieczy w mieszalniku.

*Liczba Webera* jest to liczba bezwymiarowa stosowana w mechanice płynów do charakteryzowania przepływu płynów na granicy faz układu wielofazowego [86]. Odpowiada to stosunkowi sił bezwładności do sił napięcia powierzchniowego.

Zastępuje liczba Webera dla mieszalników ma postać:

$$We = \frac{n^2 d^3 \rho}{\sigma} \quad (11)$$

Liczba ta występuje w procesach dyspergowania w mieszalnikach gazów w cieczach i cieczy wzajemnie nierozpuszczalnych.

Definicje liczb kryterialnych, które nie zawierają prędkości nie różnią się na ogół od tradycyjnych ujęć. Jeżeli w danej liczbie kryterialnej występuje wymiar liniowy, to najczęściej jest nim średnica mieszalnika  $D$  lub średnica mieszadła  $d$ .

### 3. Przegląd podstawowych typów mieszalników

Obecnie znanych jest wiele odmian konstrukcyjnych mieszalników. Różnorodność ta jest znacznie większa niż w przypadku innych aparatów spotykanych w przemyśle, np. wymienników ciepła, czy też kolumn półkowych. Bowiem o budowie mieszalnika decyduje nie tylko rodzaj mieszadła, ale również typ zbiornika mieszalnika.

Wraz z rozwojem technologii, proces mieszania również uległ ewaluacji i obok mieszania mechanicznego, stanowiącego tradycyjną metodę, zaczęto stosować mieszanie ultradźwiękowe [25, 84].

Ponieważ dane mieszadło może być wbudowane do zbiorników o różnym kształcie, powiększa to liczbę przypadków konstrukcyjnych mieszalników z którymi możemy mieć do czynienia. Konstrukcja mieszadła odgrywa niewątpliwie najważniejszą rolę w pracy mieszalnika, niemniej również i rodzaj zbiornika może mieć istotny wpływ na jego pracę [22]. Wiadomo na przykład, że zbiornik z przegrodami przedstawia w wielu przypadkach faktycznie inny typ mieszalnika niż zbiornik bez przegród, mimo że obydwa zbiorniki będą współpracować z tym samym mieszadłem. Dlatego tak ważna jest dokładna znajomość parametrów geometrycznych mieszalnika. Informacje na ten temat powinny być podawane przy każdym sprawozdaniu z pracy badawczej. Brak takich danych utrudnia porównanie wyników badań danego autora z wynikami badań innych autorów, a nawet może uniemożliwić wykorzystanie podanego wzoru do obliczeń praktycznych. Na rysunku 3.1 poniżej przedstawiono podział klasyfikacyjny mieszalników, które mogą być wykorzystywane do mieszania kompozycji klejowych.

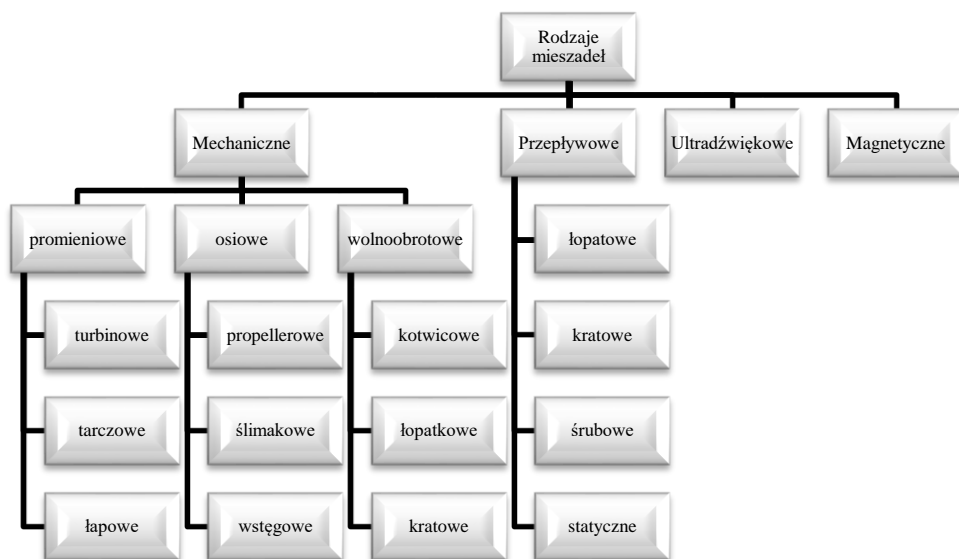


Rys. 3.1. Klasyfikacja mieszalników [opracowanie własne]

Poniżej opisano ważniejsze typy mieszalników substancji w stanie ciekłym oraz scharakteryzowano podstawowe elementy budowy mieszalników, czyli mieszadła i zbiorniki.

### 3.1. Mieszadła

Podział mieszadeł jest umowny i zależy od przyjętego kryterium podziału. Najprostszym podziałem mieszadeł jest podział na mechaniczne i niemechaniczne, jednak najbardziej adekwatnym kryterium klasyfikacji mieszadeł jest podział ze względu na kierunek przepływu strumienia. Podział mieszadeł stosowanych podczas przygotowania kleju przedstawiono na rysunku 3.2. Poniżej zostały scharakteryzowane wszystkie rodzaje wymienionych mieszadeł.



Rys. 3.2. Klasyfikacja mieszadeł stosowanych do mieszania klejów pod względem geometrycznym [opracowanie własne na podstawie 42, 60]

#### 3.1.1. Mieszadła mechaniczne

Mieszanie mechaniczne prowadzi się w celu:

- wytworzenia jednolitego roztworu lub mieszaniny,
- intensyfikacji procesów wymiany ciepła,
- intensyfikacji procesów wymiany masy czysto fizycznej, bądź też połączonej z reakcją chemiczną.

Mieszanie mechaniczne jest prowadzone w aparatach zwanych ogólnie mieszalnikami mechanicznymi. W szczególnych przypadkach aparaty te mogą być

nazywane – reaktorem, autoklawem lub bardziej szczegółowo – nitratorem, sulfonatorem.

W przypadku mieszadeł mechanicznych jeżeli za podstawę podziału przyjmujemy zakres częstości obrotów, przy których może mieszadło pracować, będą to mieszadła:

- a) wysokoobrotowe,
- b) niskoobrotowe.

Jeżeli za podstawę podziału przyjmujemy profil prędkości cieczy w mieszalniku, będą to mieszadła:

- a) wytwarzające promieniowy strumień cieczy,
- b) wytwarzające osiowy strumień cieczy,
- c) wytwarzające okrężny (styczny) strumień cieczy.

Wreszcie, jeżeli za podstawę podziału przyjmujemy konstrukcję mieszadła, będą to np. mieszadła:

- a) turbinowe,
- b) śmigłowe,
- c) łapowe,
- d) itd.

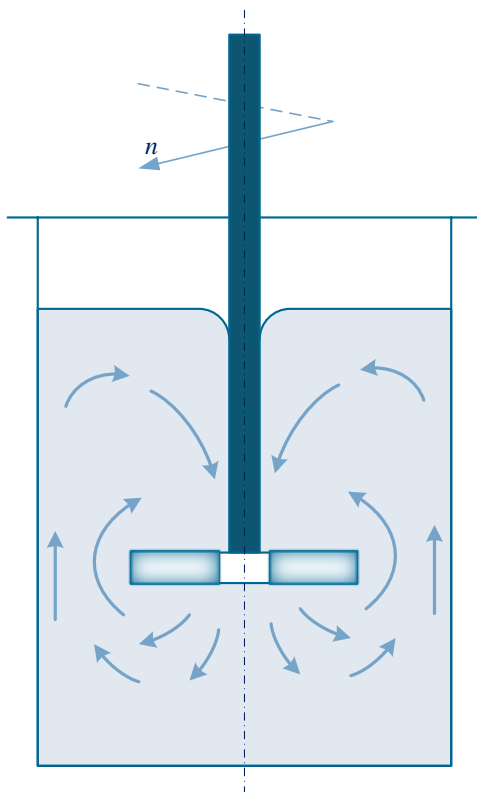
Do grupy mieszadeł wysokoobrotowych zaliczyć można mieszadła śmigłowe oraz turbinowe różnych typów, jak również specjalne typy mieszadeł, np. tarczowe z zębami itp. Mieszadła te w zależności od kształtu łopatek oraz ich ustawienia mogą wytwarzać strumień cieczy promieniowy, osiowy lub strumień mieszany promieniowo-osiowy.

Strumień promieniowy wytwarzają mieszadła turbinowe zakryte lub w przybliżeniu mieszadła turbinowe odkryte z łopatkami prostymi lub zakrzywionymi.

Strumień osiowy wytwarzają w przybliżeniu mieszadła śmigłowe oraz ślimakowe, a dokładnie mieszadła śmigłowe z dyfuzorem oraz ślimakowe z dyfuzorem. Strumień pośredni wytwarzają mieszadła turbinowe z łopatkami pochyłymi do płaszczyzny obrotu mieszadła.

Mieszadła wysokoobrotowe pracują najczęściej w zbiornikach z przegrodami. Brak takich przegród powoduje zawirowanie cieczy w mieszalniku i tworzenie się leja, jak na rysunku poniżej (rys. 3.3).





Rys. 3.3. Mieszadło śmigłowe lub turbinowe, zbiornik bez przegród [75]

Do grupy mieszadeł niskoobrotowych są zaliczane mieszadła łapowe, kotwiczne oraz ramowe.

Mieszadła te wytwarzają głównie okrężny strumień cieczy, tj. ciecz obraca się wokół mieszalnika. Do grupy mieszadeł niskoobrotowych są zaliczane również mieszadła ślimakowe oraz wstępowe.

Oprócz mieszadeł wymienionych w powyższych dwóch grupach istnieją specjalne konstrukcje mieszadeł, np. mieszadła wytwarzające duże naprężenia ścinające, mieszadła wibracyjne, skrobakowe itd.

W literaturze niestety zauważa się brak dotychczas uniwersalnego kryterium umożliwiającego dokonanie wyboru odpowiedniego mieszadła dla danego procesu. Przy wyborze mieszadła kierować należy się więc doświadczeniem zdobytym dzięki obserwacji pracy poszczególnych urządzeń lub zaleceniami producentów stosowanych substancji, jeśli takowe występują. Nie może to być oczywiście wybór optymalny, a nawet często nie jest on pozbawiony czynników subiektywnych, np. skutek przyzwyczajenia panującego w danej technologii. Ważną rolę przy wyborze mieszadła odgrywają parametry fizyczne mieszanej cieczy, a głównie lepkość. Panuje ogólna zasada, że do mieszania cieczy o małej

lepkości nadają się mieszadła wysokoobrotowe, natomiast dla cieczy o dużych lepkościach należy stosować mieszadła niskoobrotowe.

Stręk w swojej pracy [75] przedstawia wykres granic stosowalności różnych typów mieszadeł. Z wykresu tego wynika, że duży zakres zastosowania mają mieszadła turbinowe oraz śmigłowe, które nadają się do mieszania cieczy o dużym zakresie lepkości. Pozostałe mieszadła mają węższy zakres zastosowania. Według autora dla cieczy o bardzo dużych lepkościach nadają się najlepiej mieszadła ślimakowe oraz wstęgowe, natomiast dla cieczy o lepkości umiarkowanej można zastosować kilka typów mieszadeł.

Poniżej opisane zostaną ważniejsze odmiany konstrukcyjne mieszadeł znajdujących szerokie zastosowanie w technologii klejenia.

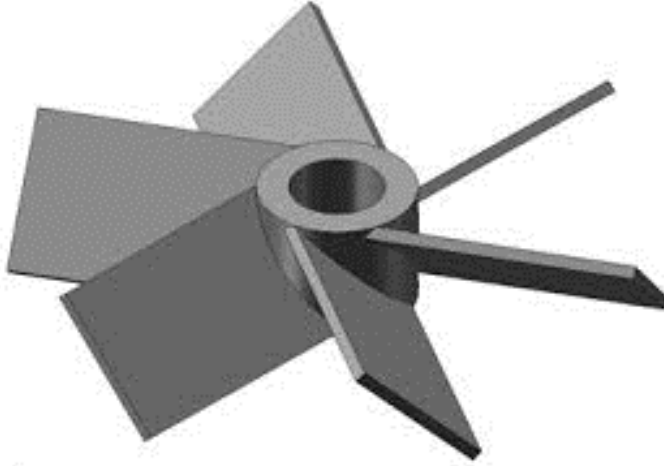
### 3.1.1.1. Mieszadła turbinowe

Mieszadła turbinowe są to na ogół mieszadła wielołopatkowe, mające wyraźnie ukształtowany wirnik (dlatego też często określane są jako mieszadła wirnikowe) [13].

Jeśli łopatki mieszadła są zbudowane tak, że tworzą zamknięte kanały na wzór wirnika pompy odśrodkowej, mieszadło takie jest nazywane mieszadłem turbinowym zamkniętym. Natomiast tak zwane mieszadła otwarte mają łopatki bez obudowy. Stosunek średnicy mieszadła do średnicy zbiornika w jakim powinno być stosowane  $\frac{d}{D}$  dla tych mieszadeł jest mały i wynosi zwykle  $\frac{d}{D} = \frac{1}{4} - \frac{1}{3}$ . Częstota obrotów może wynosić  $n = 2-20$  obr/s, tak że prędkość obwodowa końca łopatek  $u = \pi dn$  waha się w zakresie 3–10 m/s.

W zależności od sposobu umocowania łopatek oraz ich kształtu spotyka się w przemyśle różne typy mieszadeł turbinowych.

Szerokie zastosowanie znajdują mieszadła turbinowe o pełnej długości łopatek. Mieszadła takie mają łopatki przymocowane bezpośrednio do piasty, albo do wału za pomocą śrub lub za pomocą spawania. Łopatki płaskie mogą być usytuowane promieniowo, mogą być pochylone względem płaszczyzny obrotu mieszadła lub względem promienia oraz mogą być wygięte w różny sposób. Przykład tego rodzaju mieszadeł przedstawiono na rysunku 3.4 oraz rysunku 3.5.



Rys. 3.4. Mieszadło turbinowe z łopatkami pochylonymi [opracowanie własne]



Rys. 3.5. Mieszadło turbinowe z łopatkami wygiętymi [100]

Oddzielną grupę mieszadeł turbinowych stanowią mieszadła zakryte budowane na wzór wirników pomp odśrodkowych. Wirniki takie mogą być wykonane z blachy metodą spawania, bądź też jako wirniki odlewane. Mieszadła tego typu mogą współpracować z kołem kierowniczym, które stanowi nieruchomy wieniec z łopatkami o odpowiednim zakrzywieniu. Konstrukcję tego mieszadła przedstawiono na rysunku 3.6.

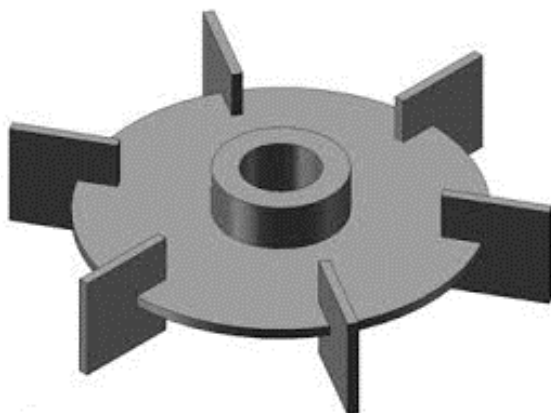


Rys. 3.6. Mieszadło turbinowe z kierownicą [opracowanie własne, 12]

Kierownica ma za zadanie wyprostować strumień cieczy wyrzucany przez mieszadło, przez co stają się zbędne przegrody w mieszalniku. Łopatki koła kierowniczego powinny być zakrzywione tak, aby wektor prędkości bezwzględnej cieczy opuszczającej mieszadło był styczny do łopatek kierownicy na wlocie. Na wylocie z kierownicy ciecz powinna być wyrzucana promieniowo lub osiowo. Kierownica może być przymocowana przez odpowiednią konstrukcję do zbiornika mieszalnika lub też odpowiedniej nieruchomej tulei, w której obraca się wał.

### 3.1.1.2. Mieszadła tarczowe

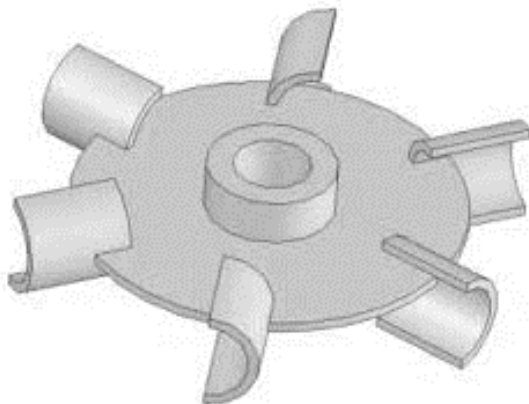
Oprócz mieszadeł turbinowych szerokie zastosowanie znajdują również mieszadła turbinowe tarczowe, nazywane także tarczowymi lub dyskowymi. Przykład geometrii takiego mieszadła przedstawiono na rysunku 3.7.



Rys. 3.7. Mieszadło turbinowe tarczowe z łopatkami prostymi [opracowanie własne]

Mieszadła tego typu zostały rozpowszechnione przez firmę Equipment Co. [56]. Najprostsze, a zarazem dające doskonałe efekty pracy jest mieszadło tarczowe z łopatkami prostymi usytuowanymi promieniowo, zwane potocznie turbinką Rushtona [63].

Konstrukcja tego rodzaju mieszadła jest szczególnie prosta. Łopatki mogą być do tarczy przyspawane lub przymocowane za pomocą śrub. Łopatki mogą być proste lub zakrzywione. Mieszadła z zakrzywionymi łopatkami wymagają mniejszej mocy. Przykład mieszadła z zakrzywionymi łopatkami przedstawiono na rysunku 3.8.



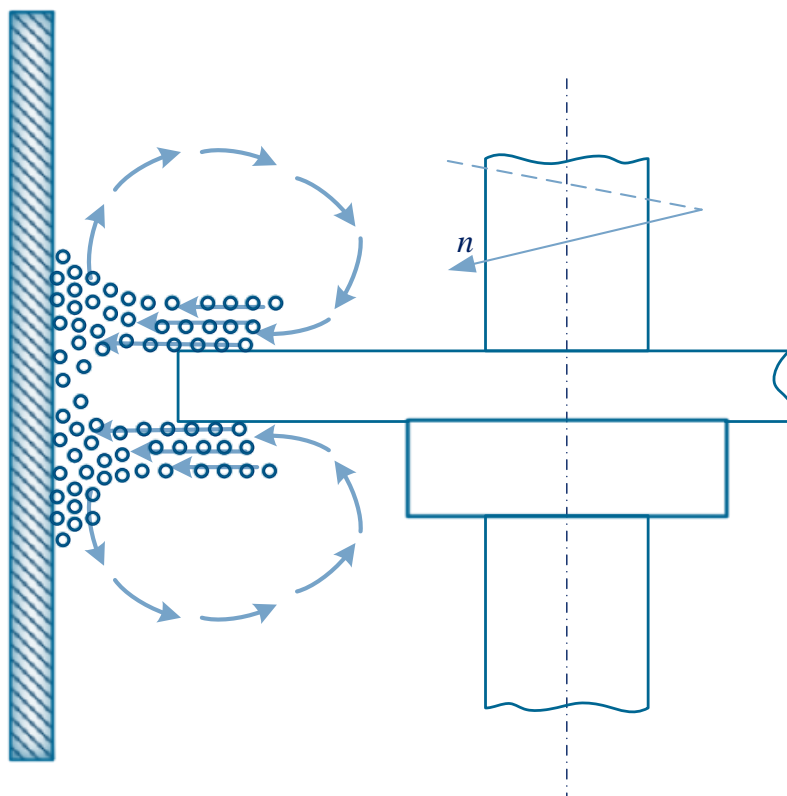
Rys. 3.8. Mieszadło turbinowe tarczowe z zakrzywionymi łopatkami [opracowanie własne]

Mieszadła turbinowe mogą mieć również charakter mieszadeł zamkniętych, których łopatki są zbudowane tak, że tworzą zamknięte kanały na wzór wirnika pompy odśrodkowej. Przykład takiego mieszadła przedstawiono na rysunku 3.9.



Rys. 3.9. Mieszadło turbinowe tarczowe zamknięte z łopatkami prostymi [112]

Mieszadła tarczowe zaliczane są także do mieszadeł wytwarzających duże naprężenia ścinające. Mieszadła tarczowe, ze względu na małą moc w porównaniu z innymi mieszadłami mogą pracować przy bardzo dużych prędkościach obwodowych (prędkości obwodowe mogą wynosić 5–35 m/s). Zasadę działania mieszadła tarczowego przedstawiono na rysunku 3.10.



Rys. 3.10. Zasada działania mieszadła tarczowego [75]

Energia mieszania podczas mieszania mieszadłem tarczowym przekazywana jest do cieczy w bezpośrednie sąsiedztwo tarczy wskutek tarcia tarczy o ciecz. Ze względu na duże prędkości obwodowe powstają wokół tarczy duże gradienty prędkości, co powoduje powstawanie tam dużych naprężeń ścinających. Wówczas następuje „mielenie” płynu (homogenizacja), podobnie jak w przypadku procesu zachodzącego w młynkach koloidalnych, dzięki czemu można zaobserwować pozytywny wpływ na dyspersję mieszanych cieczy. Odpowiednie nacięcia, na wzór piły tarczowej lub frezu na obwodzie tarczy wykonywane są celu polepszenia efektu ścinającego. Przykład tego typu mieszadła przedstawiono na rysunkach 3.11, 3.12.

Duże naprężenia ścinające wytwarzają też mieszadła turbinowe z łopatkami ściętymi (rys. 3.13).



Rys. 3.11. Mieszadło tarczowe profilowane [94]



Rys. 3.12. Mieszadło tarczowe z zębami trapezowymi [100]





**Rys. 3.13. Mieszadło tarczowe z zębami skośnymi [109]**

Mieszadła wytwarzające duże naprężenia ścinające są chętnie używane w procesach dyspersji w układach niejednorodnych (np. w procesach ekstrakcji oraz absorpcji), do mieszania cząstek ciała stałego z lepkiemi cieczami, do rozrywania cząstek włóknistych lub kruszenia cząstek ciała stałego, itd.

Mieszadła tego typu, szczególnie zwykłe tarcze, wywołują słabą cyrkulację cieczy w zbiorniku, zaś zasięg ich działania jest niewielki. Dlatego też coraz częściej na jednym wale umieszcza się kilka tarcz. Przykład takiego mieszadła przedstawiono na rysunku 3.14.

Mieszadła tego typu znajdują zastosowanie często w kolumnach ekstrakcyjnych.



Rys. 3.14. Mieszadło tarczowe z podwójną tarczą [105]

### 3.1.1.3. Mieszadła łapowe

Mieszadła łapowe są to na ogół mieszadła wolnoobrotowe, najczęściej z dwoma łopatkami (łapami) o większej długości w stosunku do średnicy zbiornika niż w przypadku łopatek mieszadeł turbinowych. Jako normę średnicy  $d$  i wysokości łopatek  $b$  dla tych mieszadeł można przyjąć  $d = (0,5-0,8) \cdot D$  oraz  $b = (0,1-0,2) \cdot d$ . Wysokość zawieszenia mieszadła od dna naczynia  $h = (0,1-0,3) \cdot d$ , natomiast wysokość cieczy w zbiorniku  $H = (0,8-1,3) \cdot D$ . Jeżeli mieszanie prowadzi się w naczyniach głębokich, na wale można mocuje się kilka mieszadeł. Prędkość obwodowa mieszadeł łapowych leży w granicach 1,5–4 m/s. Na rysunku 3.15 i rysunku 3.16 przedstawiono przykłady mieszadeł łapowych.



**Rys. 3.15. Mieszadło łopowe z łopatkami niskimi [94]**



**Rys. 3.16. Mieszadło łopowe z łopatkami skrzyżowanymi [97]**

Dokładne rozgraniczenie mieszadeł łopowych od turbinowych jest niekiedy trudne, gdyż w pewnych przypadkach mieszadła te mogą mieć takie same wymiary i podobną geometrię. Z tego też powodu często stosuje się zamiennie nazewnictwo mieszadeł łopkowych dla określania mieszadeł łopowych i turbinowych otwartych.

Mieszadła łopowe należą do najstarszych w przemyśle, są jednak stosowane do dnia dzisiejszego w tych przypadkach, w których nie jest konieczne wytworzenie intensywnej cyrkulacji osiowo-promieniowej cieczy w mieszalniku. Mieszadła tego typu wytwarzają głównie okrężną cyrkulację cieczy (obwodową), natomiast cyrkulacja osiowo-promieniowa jest nieznaczna.

Zasadniczą zaletą mieszadeł łopowych jest ich prostota.

Wadą tego typu mieszadeł jest natomiast słaba intensywność mieszania. Bardziej intensywnie od łopatek prostych działają łopatki pochylone. Przykład mieszadła z pochylonymi łopatkami przedstawiono na rysunku 3.17.



Rys. 3.17. Mieszadło łopowe z łopatkami pochylonymi [97]

Mieszadła z pochylonymi łopatkami stosowane są do mieszania cieczy trudno mieszających się, o znacznej różnicy gęstości, jak również do wytwarzania zawiesin oraz emulsji. Najczęściej stosuje się nachylenie  $45^\circ$ . Mocowane są także na jednym wale dwie lub trzy pary łap w sposób skrzyżowany, przez co lepiej jest mieszana cała objętość.

Spotykane są również mieszadła łopowe z łopatkami wysokimi o szerokości łopatki  $b = (0,8 - 1,2) \cdot d$ . Mieszadła takie są nazywane też mieszadłami tarczowymi. Ich średnicę przyjmuje się zwykle równą  $0,5D$ . Prędkość obwodowa nie powinna przekraczać  $2,5 \text{ m/s}$ . Przykład takiego mieszadła przedstawiono na rysunku 3.18.



Rys. 3.18. Mieszadło łopowe z wysokimi łopatkami [98]

Mieszadła z wysokimi łopatkami pracują zadowalająco w oparach rozpuszczania oraz przy wymianie ciepła. W łopatkach tego typu zwykle nawiercane są otwory, przez co większa się burzliwość mieszanej cieczy.

#### 3.1.1.4. Mieszadła propellerowe

Mieszadła propellerowe, częściej nazywane mieszadłami śmigłowymi są uważane za najbardziej odpowiednie w tych przypadkach, w których konieczne jest wywołanie silnej cyrkulacji cieczy w mieszalniku przy najmniejszym zużyciu energii mechanicznej [30]. Spełniają one to zadanie lepiej od mieszadeł innego typu, np. mieszadeł turbinowych. Mieszadła śmigłowe wywołują osiową cyrkulację cieczy oraz silny efekt ssący, przez co łatwo unoszą cząstki ciała stałego z dna zbiornika. Używane są często także do homogenizacji cieczy o małej lepkości, jak również do intensyfikacji przebiegu reakcji chemicznej w układach ciekłych jednofazowych. Przykład mieszadła śmigłowego przedstawiono na rysunku 3.19.



Rys. 3.19. Mieszadło śmigłowe odlewane typu śruby okrętowej [107]

Stosunek  $d/D$  dla mieszadeł śmigłowych jest analogiczny, jak dla mieszadeł turbinowych i wynosi  $d/D = 1/4 - 1/3$ . Możliwe jest też zmniejszenie średnicy mieszadła do granicy  $d = D/5$ . Prędkość obwodowa końca łopatek wynosi dla mieszadeł śmigłowych 3–20 m/s.

Mieszadła śmigłowe były szeroko opisywane w uznawanych czasopiśmie, gdzie m.in. Weidenabum [80] podawał zakresy częstości obrotów tych mieszadeł. W obecnym czasie informacje te podawane są głównie przez producentów poszczególnych typów mieszadeł. Dla mieszadeł śmigłowych prędkości obrotowe proponowane przez producentów są następujące:

- $n_l = 400$  obr/min – mieszadła niskoobrotowe, używane do ciężkich substancji, np. żywic, olejów, itd. oraz dla układów wykazujących skłonności do pienienia się. Nie należy przekraczać  $n_l$  jeżeli lepkość cieczy mieszanej  $\eta \geq 200$  mPas lub jeżeli objętość cieczy w mieszalniku  $V_c \geq 7,5$  m<sup>3</sup>.

- $n_2 = 1150$  obr/min – mieszadła średnioobrotowe, używane do średniolepkich olejów, lakierów itd. Nie należy przekraczać  $n_2$  jeżeli lepkość cieczy mieszanej  $\eta \geq 50$  mPas lub jeżeli objętość cieczy w mieszalniku  $V_c > 2$  m<sup>3</sup>.
- $n_3 = 1750$  obr/min – mieszadła wysokoobrotowe mające zastosowanie do cieczy o małych lepkościach i mieszalników o małych objętościach. Jeżeli lepkość cieczy mieszanej  $\eta > 100$  mPas, a wysokość cieczy w mieszalniku  $H > 4d$  wówczas zalecane jest stosowanie więcej niż jednego mieszadła..

Mieszadła śmigłowe są eksploatowane przy dużych częstościach obrotów i ze względu na to mogą być połączone bezpośrednio z silnikiem elektrycznym bez przekładni, co obniża koszty eksploatacji tego rodzaju mieszadła.

Coraz częściej zastosowanie znajdują mieszadła ślimakowe z podwójnymi łopatkami na wale. Przykład tego rodzaju mieszadła przedstawiono na rysunku 3.20.

Łopatki mieszadła śmigłowego mogą być odlewane razem z piastą lub też przymocowane do niej za pomocą śrub.

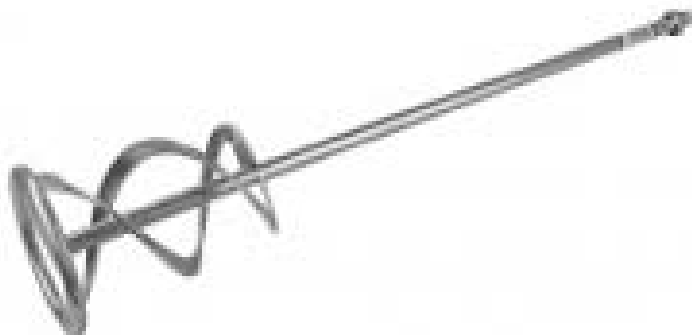


Rys. 3.20. Mieszadło śmigłowe z podwójnymi łopatkami [107]

#### 3.1.1.5. Mieszadła ślimakowe

Mieszadła ślimakowe, zwane też śrubowymi, pracują na podobnej zasadzie co i mieszadła śmigłowe, lecz przy mniejszych częstościach obrotów, bo około 1–4 obr/s. Znajdują one zastosowanie podczas mieszania cieczy o dużych lepkościach (do 10<sup>5</sup> mPas). Wymagają mniejszej mocy od mieszadeł śmigłowych dla wywołania tej samej cyrkulacji cieczy w mieszalniku. Mieszadła ślimakowe pracują najczęściej w ten sposób, że ciecz jest podnoszona przez mieszadło do góry, mimo że mają one wówczas większą moc. Przykład mieszadła ślimakowego przedstawiono na rysunku 3.21.

Dla cieczy o lepkościach szczególnie dużych (do  $10^6$  mPas) oraz przy dużych objętościach cieczy stosuje się specjalną odmianę mieszadeł ślimakowych – mieszadła wstęgowe.

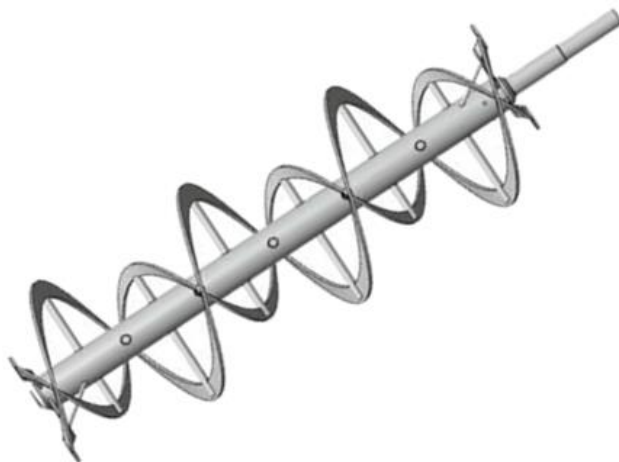


Rys. 3.21. Mieszadło ślimakowe [100]

#### 3.1.1.6. Mieszadła wstęgowe

Mieszadła wstęgowe mają zwykle dwie spirale (zewnętrzną oraz wewnętrzną) o przeciwnych skrętach, co powoduje osiową cyrkulację cieczy w zbiorniku. Mogą one pracować zarówno w zbiornikach pionowych, jak i poziomych. Przykład mieszadła wstęgowego przedstawiono na rysunku 3.22.

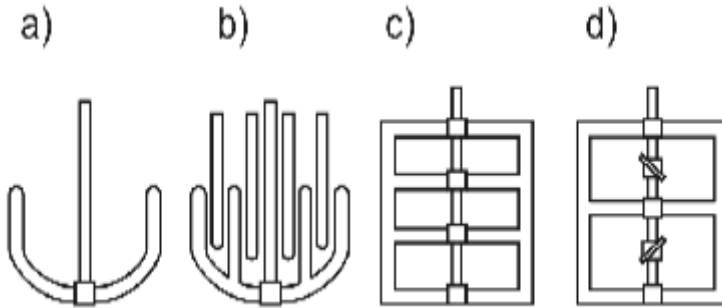
Mieszadła wstęgowe pozwalają unikać w mieszalniku martwych przestrzeni, dzięki czemu możliwe jest osiągnięcie szybkiej homogenizacji zawartości mieszalnika w krótkim czasie. Mieszadła wstęgowe znajdują zastosowanie przy wyrobie klejów.



Rys. 3.22. Mieszadło wstęgowe [87]

### 3.1.1.7. Mieszadła kotwicowe, łopatkowe i kratowe

Mieszadła kotwicowe, łopatkowe i kratowe ze względu na swoją budowę i zasadę działania zaliczane są do mieszadeł mechanicznych wolnoobrotowych. Na rysunku 3.23 przedstawiono przykłady rozwiązań mieszadeł kotwicowych i ramowych.



Rys. 3.23. Przykłady rozwiązań mieszadeł kotwicowych i ramowych: a) mieszadło kotwicowe o kształcie eliptycznym, b) mieszadło kotwicowe z palcami oraz przegrodami pionowymi, c) mieszadło ramowe, d) mieszadło ramowe z zabudowanymi dodatkowymi mieszadłami łopatkowymi [67]

Prędkość obrotowa mieszadeł takiej konstrukcji zawiera się w granicach 0,5–5 m/s, a częstość obrotów wynosi 0,3 obr/s. Średnica tych mieszadeł powinna być zbliżona do średnicy zbiornika mieszalnika, czyli mieszadła te pracują przy małym prześwicie między łopatką i ścianką zbiornika mieszalnika, zazwyczaj parametr ten wyznaczany jest równaniem:  $e = \frac{1}{2} \cdot (D - d) = (0,005 - 0,1) \cdot D$ . W ten sposób przy użyciu takiego mieszadła można zapobiec lokalnemu przegrzaniu cieczy oraz tworzeniu osadu na ściance lub na dnie zbiornika. Mieszadła kotwicowe, tarczowe i ramowe stosuje się w przypadku cieczy o dużych lepkościach. Mieszadła kotwicowe nadają się do mieszania cieczy o lepkości  $10^3$  mPas, natomiast mieszadła ramowe – do cieczy o lepkości  $10^5$  mPas. Przykłady tego typu mieszadeł przedstawiono na rysunkach 3.24–3.26.

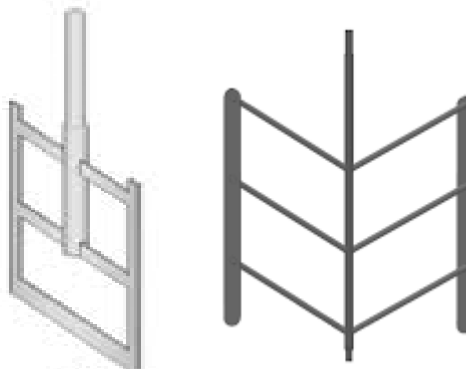




Rys. 3.24. Przykłady konstrukcji mieszadeł kotwicowych [100, 102]



Rys. 3.25. Przykład konstrukcji mieszadła łopatkowego [102]



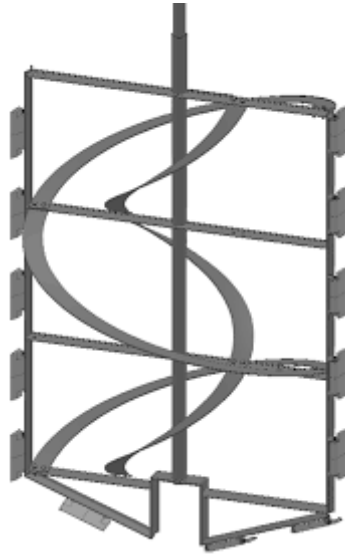
Rys. 3.26. Przykłady konstrukcji mieszadeł kratowych [31, 96]

Ponieważ mieszadła kotwicowe, łopatkowe i kratowe swoim kształtem są dopasowane do obrysu naczynia rozróżnia się mieszadła kotwicowe: koliste, eliptyczne, trójkątne, itd.

W przypadku bardzo lepkich cieczy mieszadła tego rodzaju wyposażane są w dodatkowe człony poprzeczne lub pionowe. Stąd właściwie mieszadło kratowe to zmodyfikowane mieszadło kotwicowe. Wyposażenie mieszadła kotwicowego w dodatkowe elementy pionowe, wówczas zwiększa się burzliwość mieszanej cieczy oraz intensywność mieszania w całej objętości zbiornika mieszalnika. Podobny efekt uzyskuje się stosując wewnątrz ramy dodatkowe mieszadła. Przykład konstrukcji takiego mieszadła przedstawiono na rysunkach 3.27, 3.28.



Rys. 3.27. Zmodyfikowane mieszadło kotwicowe [100]



Rys. 3.28. Mieszadło kratowo-wstęgowe [96]

Modyfikacje konstrukcji mieszadeł dają wiele możliwości. Producenci mieszadeł, które znajdują zastosowanie w procesie mieszania klejów łączą w jednym narzędziu kilka rozwiązań, dzięki czemu możliwe jest mieszanie substancji o różnej lepkości z dodatkowymi składnikami pozwalając uzyskać jednocześnie jednorodną strukturę.

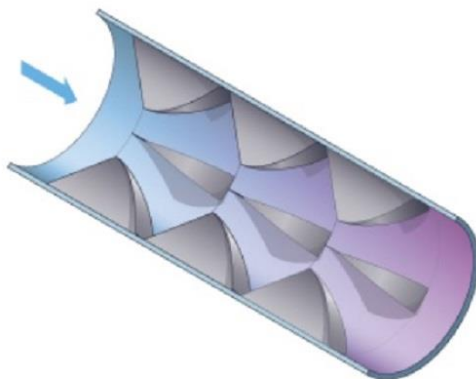
### 3.1.2. Mieszadła przepływowe

Proces mieszania kompozycji klejowych może odbywać się także za pomocą bardziej zaawansowanych narzędzi, do jakich zaliczyć można mieszadła przepływowe. Wykorzystywane w operacji sporządzania masy klejowej mieszadła przepływowe charakteryzują się tym, że mieszanie poszczególnych składników kleju następuje wskutek ich przepływu przez odpowiednio ukształtowaną cylindryczną komorę. Komora ta może być dodatkowo ogrzewana, a jej kształt, długość oraz średnica części roboczych dobierane są w zależności od rodzaju kleju (uwzględniając zwłaszcza jego lepkość) i wymaganej wydajności procesu mieszania. Przykłady różnych rozwiązań konstrukcyjnych mieszadeł przepływowych przedstawiono poniżej.

#### 3.1.2.1. Mieszadła łopatkowe

Mieszadła przepływowe łopatkowe zapewniają pełne zmieszanie w przewodach rurowych i powodują bardzo niskie spadki ciśnienia. Łopatki mieszadła znajdują się wewnątrz rury, wokół jej obwodu, odwracając przepływ, powodując szybkie i dokładne zmieszanie. Przykład geometrii mieszadła przepływowego łopatkowego przedstawiono na rysunku 3.29.

Dodatkowe stopnie łopatek umiejscowione w kilku rzędach powodują powstawanie dodatkowych wirów mieszanych substancji.



Rys. 3.29. Przekrój wnętrza mieszadła przepływowego łopatkowego [93]

### 3.1.2.2. Mieszadła kratowe

Kratowe elementy mieszające są bardzo wydajne przy mieszaniu strumieni przepływu w bardzo różnym tempie i o różnej lepkości. Przecinają szybko strumienie przepływu i mają mniejszą długość w porównaniu do np. śrubowych elementów mieszających. Mieszadła tego typu występują z rurą obudowy/ osłony lub jako sam pręt mieszający do montażu w miejscu instalacji w mieszalniku. Przykład takiego mieszadła zamieszczono na rysunku 3.30.



Rys. 3.30. Mieszadło przepływowe kratowe [93]

Charakterystyczną zaletą tego typu urządzeń, jak wszystkich mieszadeł przepływowych, jest możliwość uzyskania prawie 100% zmieszania składników kleju bez ich kontaktu z powietrzem atmosferycznym. Dzięki temu ogranicza się powstawanie pęcherzyków powietrza wpływających na zmniejszenie wytrzyma-

łości spoiny klejowej. Podział strumienia kleju zależy wykładniczo od liczby sekcji mieszających części roboczej urządzenia [40]:

$$N = 2^E \quad (12)$$

gdzie:

N – liczba strumieni,

E – liczba sekcji mieszających.

### 3.1.2.3. Mieszadła śrubowe

Mieszadła śrubowe przepływowe zapewniają nieprzerwane mieszanie substancji w ciągu liniowym poprzez naprzemienne elementy śrubowe ustawione co  $90^\circ$  w stosunku do elementów z nimi sąsiadujących, zapewniającym tym samym kompozycję klejową o dużym stopniu homogeniczności. Mieszadła śrubowe mogą być osłaniane lub ogrzewane elektrycznie i dostarczane ze stałymi lub wymiennymi prętami elementów. Średnica takich mieszadeł waha się od 2 mm do ponad 2 metrów [93]. Przykład tego rodzaju mieszadeł przedstawiono na rysunku 3.31.



Rys. 3.31. Mieszadło przepływowe śrubowe osłonięte [93]

Mieszadła śrubowe stosowane w technologii sporządzania kompozycji klejowych występują również w postaci prętów mieszających. Przykład takich mieszadeł przedstawiono na rysunku 3.32.



Rys. 3.32. Mieszadło przepływowe śrubowe – pręty mieszające [93]

Dzięki bardzo gładkim kształtom, doskonałemu wykończeniu powierzchni ( $Ra\ 0,6\text{--}0,8$ ) w mieszadłach śrubowych nie ma żadnych martwych punktów mogących powodować zawiesiny lub degradację produktów mieszanin.

Na rysunku 3.33 przedstawiono istotę mieszania przy użyciu śrubowego mieszadła przepływowego.

Pierwszy element śrubowy powoduje obracanie się przepływu w jednym kierunku, a następnie kierunek jest odwrócony w kolejnym elemencie. Takie działanie tworzy dodatkowy efekt mieszania, sprzyjający uzyskiwaniu jednolitości mieszaniny. Wymuszone jest całkowite odwrócenie przepływu, tak, aby strumień przepływu był stale przesuwany do środka, do ścianki wewnętrznej rury i z powrotem.



Rys. 3.33. Schemat działania mieszadła śrubowego [5, 67]

#### 3.1.2.4. Mieszadła statyczne

Proces mieszania klejów można realizować także za pomocą różnego rodzaju mieszadeł, współpracujących z urządzeniami do dozowania w postaci pistoletów klejowych. Na rynku istnieje wiele firm oferujących różnego typu mieszadła. Są to zarówno mieszadła jednorazowe, jak i wielokrotnego użytku. Mieszadła statyczne jednorazowe, ze względu na rodzaj budowy występują w formie mieszadeł okrągłych, kwadratowych oraz stożkowych w których elementy znajdujące

się wewnątrz mieszadła mogą mieć kształt spirali, kwadratów lub budowę kratową. W mieszadłach spiralnych występują spirale, które mogą obracać się w prawo lub w lewo, dzięki czemu jest zapewnione dokładne zmieszanie kleju. Konstrukcja kwadratowych mieszadeł składa się z elementów lewo i prawoskrętnych z przemiennikami przepływu przerywanego, które prowadzą płyny od ścian do środkowej części mieszadeł i ze środka w kierunku ścian w celu dokładnego i całkowitego zmieszania. Konstrukcję tego rodzaju mieszadeł przedstawiono na rysunku 3.34.



Rys. 3.34. Przykłady mieszadeł statycznych [90]

Mieszadła statyczne jednorazowe nazywa się również mikserami statycznymi lub dyszami mieszającymi. Stosowane są głównie do klejów dwuskładnikowych dostępnych w kompatybilnych tubach. Mieszanie składników w mieszadłach statycznych realizowane jest poprzez podział i ponowne połączenie w jednorodny strumień kleju przechodzący przez szereg elementów umieszczonych pod zmieniającymi się kątami. Elementy mieszające wykonane są głównie z polioksymetylenu lub polipropylenu. Dobierając odpowiednie mieszadło statyczne jednorazowe należy wziąć pod uwagę takie zmienne jak:

- wejście, które zależy od rodzaju tuby, w jakiej znajduje się klej przeznaczony do użycia,
- liczbę elementów mieszających, co jest zależne od gęstości czy lepkości kleju. Im gęstsza substancja, tym lepiej zastosować mieszadło z większą ilością elementów mieszających,
- średnica mieszadła, która również zależy od gęstości i lepkości kleju. Im gęstszy klej, tym średnica mieszadła powinna być większa.

Wśród mieszadeł statycznych wyróżnić można także mieszadła wielorazowe. Przykład takiego mieszadła przedstawiono na rysunku 3.35.



**Rys. 3.35. Mieszadło statyczne wielorazowe [108]**

Mieszadła wielokrotnego użytku, najczęściej wykonane są z metalu, przy czym elementy mieszające mogą być metalowe lub polimerowe. Mieszadła metalowe zazwyczaj wyposażone są w gwintowane rurki na obydwu końcach, aby ułatwić podłączenie ze stanowiskiem, w którym przygotowywany jest klej. Często mieszadła statyczne wielorazowe klasyfikowane są również jako mieszadła przepływowe śrubowe.

Coraz częściej oferowane przez producentów są także mieszadła dynamiczne, które różnią się od mieszadeł statycznych tym, że posiadają obrotowy element mieszający. Są jednak dużo droższe ponieważ do ich właściwego funkcjonowania potrzebna jest specjalna głowica, która napędza element mieszający. Przykład mieszadła dynamicznego przedstawiono na rysunku 3.36.





Rys. 3.36. Mieszadło dynamiczne [90]

Dodatkowo w przypadku mieszadeł dynamicznych występuje zjawisko napowietrzenia mieszanych kompozycji klejowych. Jednak mieszadła dynamicznie dużo lepiej sprawdzają się w przypadku bardzo gęstych produktów, lub tam gdzie mieszane składniki cechuje duża różnica gęstości.

### 3.1.3. Mieszadła ultradźwiękowe

Mieszadła ultradźwiękowe stosowane są do mieszania szerokiej gamy substancji. Oprócz klejów znajdują zastosowanie w mieszaniu farb, tuszy, powłok kolorystycznych czy smarów.

W tego rodzaju mieszadłach wzbudzenie ultradźwiękowe miesza płyny z innymi płynami lub ciałami stałymi w celu poprawy kinetyki procesu mieszania. Mieszadła ultradźwiękowe dostępne na rynku proponowane w różnych rozmiarach, od mieszadeł laboratoryjnych po mieszadła przemysłowe.

W przypadku wielu procesów, mieszadła ultradźwiękowe mogą znacznie skrócić czas trwania procesu i zwiększyć efektywność wydajności produkcyjnej. Dzięki temu, mieszadło ultradźwiękowe pomaga poprawić wydajność i obniżyć koszty produkcji. Jak wspomniano powyżej, mieszadła ultradźwiękowe znajdują zastosowanie zarówno do zastosowań laboratoryjnych oraz przemysłowych, gdyż są niezbędnym narzędziem w badaniach i rozwoju procesów. Podczas, gdy konwencjonalne mieszadła często wymagają znacznej minimalnej objętości, mieszadła ultradźwiękowe można stosować już od 150  $\mu\text{l}$  [101]. Występują w wariantach kompaktowych ręcznych mieszadeł, jaki i mieszadeł na statywach do montowania w zbiornikach do mieszania. Przykłady takich mieszadeł przedstawiono na rysunkach 3.37, 3.38.



Rys. 3.37. Przemysłowe mieszadło ultradźwiękowe na ruchomym stojaku podnośnika produkcji firmy Hielscher [101]



Rys. 3.38. Kompaktowe urządzenie ultradźwiękowe [101]

Mieszadła przemysłowe mają moc od 500 W do 16 kW mocy ultradźwiękowej na jedną sondę ultradźwiękową. Często w przemyśle stosowane są układy wielu sond ultradźwiękowych w celu uzyskania większej całkowitej mocy wyjściowej ultradźwięków.

Zaletą mieszadeł ultradźwiękowych jest możliwość łatwego czyszczenia części roboczej, gdyż zwykle wykonywane są z materiału odpornego na korozję, najczęściej z tytanu klasy 5. Ponadto ultradźwiękowe mieszadła mają bardzo prostą symetryczną geometrię obrotową i nie posiadają uszczelnień obrotowych, które mogą przeciekać lub zużywać się.

#### 3.1.4. Mieszadła magnetyczne

Mieszadła magnetyczne służą do bezkontaktowego mieszania cieczy.

Istnieją dwie podstawowe konstrukcje elementów generujących rotujące pole magnetyczne w tego rodzaju mieszadłach:

- układ statycznych elektromagnesów, które są naprzemiennie włączane i wyłączane, co wywołuje rotację pola podobnie jak to jest w silnikach elektrycznych,
- komplet magnesów trwałych, umieszczonych na płaskiej tarczy, która jest obracana przez niezależny silnik elektryczny.

Mieszadła z układem statycznych elektromagnesów są prostsze w konstrukcji, ale nadają się tylko do napędzania niewielkich mieszadełek i występują w nich kłopoty z regulacją obrotów, zwłaszcza w niższych zakresach szybkości. Nie można ich też zintegrować ze stolikami grzewczymi, gdyż prąd płynący w elementach grzejnych zakłócałby słabe pole generowane przez tego rodzaju mieszadła. Obecnie mieszadła tego rodzaju są raczej rzadko stosowane. W miarę popularne są jeszcze mikro mieszadła, które są zdolne napędzać tylko bardzo małe mieszadełka, ale same też mają bardzo małe wymiary, dzięki czemu są poręczne.

Mieszadła z trwałymi magnesami są w stanie generować znacznie silniejsze pole magnetyczne bez zużywania dużej ilości prądu elektrycznego, a dzięki temu, że rotacja magnesów jest wywoływana przez silnik elektryczny, możliwa jest pełna regulacja jego obrotów. Ponad tarczą z magnesami można też umieścić elektryczną płytę grzejną, podobną w konstrukcji do płyt zwykłych kuchenek elektrycznych, co daje w rezultacie uniwersalne urządzenie, zdolne do jednoczesnego grzania i mieszania zawartości naczyń.

Przykłady mieszadeł magnetycznych przedstawiono na rysunku 3.39.



Rys. 3.39. Przykłady mieszadeł magnetycznych [95]

Najbardziej nowoczesne mieszadła tego rodzaju są też często zaopatrywane w precyzyjny zintegrowany termostat elektroniczny, który umożliwia pełną kontrolę temperatury w łaźniach grzejnych, które stawia się bezpośrednio na płycie grzejnej mieszadła.

Na efektywność mieszania ma wpływ, oprócz precyzyjnej kontroli szybkości obrotów i intensywności generowanego pola magnetycznego, odpowiedni dobór kształtu i rozmiaru mieszadełek do kształtu i objętości naczyń. Przykłady kształtów mieszadełek stosowanych w mieszadłach magnetycznych przedstawiono na rysunku 3.40.



Rys. 3.40. Mieszadélka magnetyczne [97]

Zbyt duże mieszadélko miesza zawartość naczynia zbyt gwałtownie lub zaczepia się o jego ścianki, przez co kręci się bardzo nierównomiernie, robiąc przy tym dużo hałasu. Zbyt małe mieszadélko tworzy natomiast lej w samym środku naczynia, przez co zawartość przy ściankach naczynia nie jest w ogóle mieszana.

Najczęściej spotykanym kształtem mieszadełek jest prosty, krótki pręt z półokrągłymi zakończeniami. Tego rodzaju mieszadélka sprawdzają się najlepiej w naczyniach płaskodennych. Czasami w środku długości tego rodzaju mieszadełek dodaje się mały karbik, zmniejszający powierzchnię kontaktu mieszadélka z płaskim dnem naczynia, co redukuje opory tarcia.

Do kolb okrągło dennych stosuje się częściej mieszadélka w kształcie piłki do rugby, gdyż taki kształt lepiej pasuje do dna będącego zakończonym połową sfery. Oprócz tych dwóch podstawowych kształtów produkowane są także mieszadélka w różnych innych specjalnie projektowanych kształtach (rys. 3.41), które w teorii mają poprawiać skuteczność mieszania, zwykle jednak ich wysoka cena, wynikająca ze skomplikowania ich produkcji, nie jest warta efektu, jaki dają.



Rys. 3.41. Mieszadła magnetyczne [97]

Do bardzo lepkich płynów (na przykład stężonych roztworów polimerów) stosuje się czasami tak zwane pełzające mieszadła, które nie wykonują prostej rotacji, lecz ich konstrukcja wymusza ruch pełzający, który skuteczniej miesza lepkie płyny. Ruch ten jest wymuszany poprzez kształty utrudniające prostą rotację oraz poprzez celowe przesunięcie środka ciężkości dipoli względem ich środka geometrycznego.

### 3.2. Mieszalniki

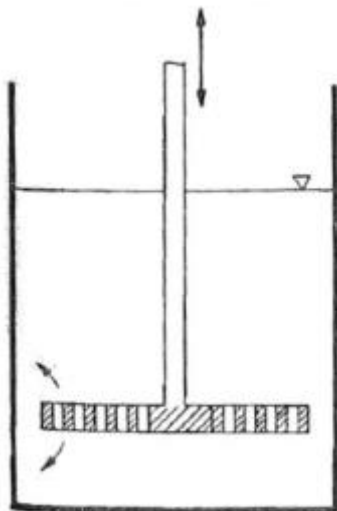
Dobór odpowiedniego systemu mieszania uzależniony jest od właściwości substancji oraz warunków procesowych, w jakich ma pracować dane urządzenie. W celu odpowiedniego zaprojektowania mieszalnika, potrzebne są informacje o właściwościach substratów i produktów, takich jak między innymi: lepkość, gęstość, profil produktu, agresywność chemiczna, objętości jednej szarży, parametrach procesowych, sposobie wytwarzania, standardzie wykonania mieszalnika i wiele innych. Zadaniem użytkowników jest dobranie typu i ilości mieszadeł pod konkretną aplikację, aby osiągnąć pożądaną wydajność i jakość produktu. W zależności od potrzeb, mieszalniki mogą być obsługiwane ręcznie lub być w pełni automatyczne. Poniżej opisane zostaną przykłady poszczególnych typów mieszalników, które klasyfikować można ze względu na sposób ich działania.

### 3.2.1. Mieszalniki mechaniczne

Mieszalniki mechaniczne są to zbiorniki wyposażone w mieszadła. Mieszanie w mieszalnikach mechanicznych zachodzi wskutek ruchu masy cieczy, wywołanego ruchem mieszadła. Mieszadła zostały sklasyfikowane i szeroko opisane w poprzednim podrozdziale. Mieszalniki mechaniczne są więc właściwie klasyfikowane analogicznie jak mieszadła. Dodatkowo można podzielić mieszalniki mechaniczne biorąc za kryterium ruch mieszadła, wówczas wyróżnia się [37]:

- mieszalniki wibracyjne,
- mieszalniki obrotowe.

Mieszalniki wibracyjne są to zbiorniki wyposażone w mieszadła tarczowe osadzone na wale, które wykonują ruchy posuwistozwrotne. Wówczas układ wprowadzany jest w ruch drgający, który w następstwie powoduje homogenizację układu. Mieszalniki te charakteryzują mało skomplikowaną budowę, prostą zasadę działania i możliwościami wykorzystania w różnych technologiach przemysłowych, dzięki czemu stanowią interesującą alternatywę dla klasycznych mieszalników z mieszadłami wysokoobrotowymi. Schemat mieszadła wibracyjnego przedstawiono na rysunku 3.42.



Rys. 3.42. Schemat mieszadła wibracyjnego [37]

Niestety – jak dotychczas – zarówno same mieszalniki wibracyjne, jak i procesy (zjawiska) zachodzące w nich podczas mieszania są stosunkowo słabo poznane i opisywane.

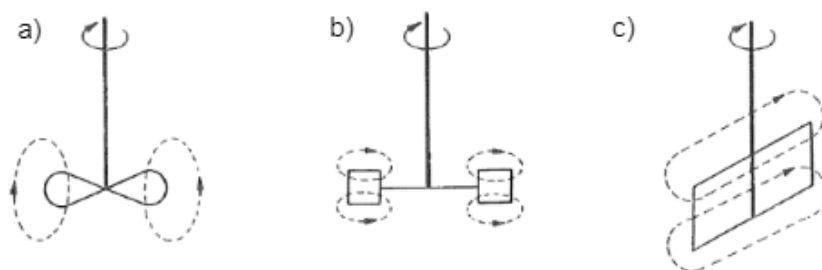
Nieliczne, prowadzone do tej pory badania laboratoryjne takich aparatów koncentrowały się przede wszystkim na sprawdzeniu ich przydatności podczas wytwarzania układów wielofazowych, np. emulsji [43], zawiesin [17] (wraz

z oszacowaniem zapotrzebowania mocy) lub też realizacji procesów wymiany ciepła i masy [82]. Wyniki badań prezentowano zwykle w postaci bezwymiarowych lub wymiarowych zależności korelacyjnych, uzyskanych na drodze modelowania fizycznego i opracowywanych z wykorzystaniem metod statystyki matematycznej.

Klasyfikacja mieszadeł obrotowych została częściowo przedstawiona w podrozdziale poświęconym mieszadłom. Mieszalniki obrotowe ze względu na kierunek przepływu strumienia cieczy w zbiorniku podzielić można na [62]:

- mieszadła wytwarzające przepływ osiowy,
- mieszadła wytwarzające przepływ promieniowy,
- mieszadła wytwarzające przepływ okrężny.

Na rysunku 3.43 przedstawiono schematycznie kierunki przepływu strumienia w odniesieniu do mieszadła.



**Rys. 3.43. Kierunki przepływu strumienia w: a) mieszadle wytwarzającym przepływ osiowy, b) mieszadle wytwarzającym przepływ promieniowy, c) mieszadle wytwarzającym przepływ okrężny [opracowanie własne]**

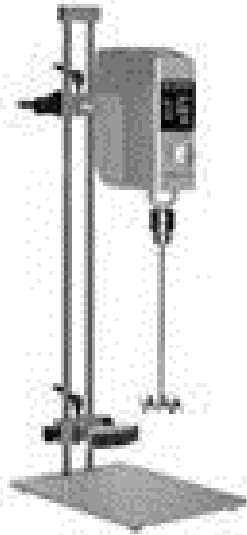
Mieszalniki z mieszadłem wytwarzającym przepływ osiowy generują przepływ cieczy równoległe do wału mieszadła. Mieszalniki z mieszadłem wytwarzającym przepływ promieniowy generują przepływ cieczy poziomo, promieniowo skierowany do ściany zbiornika. Mieszalniki z mieszadłem wytwarzającym przepływ okrężny generują przepływ cieczy poziomy, dookoła wału mieszadła.

Mieszalniki mechaniczne mogą stanowić integralną całość jako urządzenia, z wbudowanym mieszadłem, jak również mogą być to podręczne urządzenia. Przykłady konstrukcyjnych rozwiązań mieszadeł przedstawiono na rysunkach 3.44–3.46.





Rys. 3.44. Mieszalnik mechaniczny lopatkowy [91]



Rys. 3.45. Mieszalnik mechaniczny kolumnowy pionowy [104]



Rys. 3.46. Mieszalnik mechaniczny przemysłowy [99]

Mieszalniki, podobnie jak inne urządzenia, poddawane są przez użytkowników licznym modyfikacjom. Mogą być wyposażane np. w zawory umożliwiające jednoczesne mieszanie i odpowietrzanie mieszanych kompozycji, a jednocześnie mogą być to urządzenia adaptowane do urządzeń wyposażonych w napęd, jak np. wiertarka kolumnowa. Przykład tego rodzaju mieszalnika przedstawiono na rysunku 3.47.



Rys. 3.47. Mieszalnik – urządzenie do jednoczesnego mieszania i odpowietrzania kompozycji klejowych [54]

W powyżej przedstawionym urządzeniu zbiornikiem mieszalnika jest szklane naczynie cylindryczne, co daje możliwość uniknięcia reakcji, jaka może wystąpić w przypadku mieszania kompozycji w naczyniu wykonanym z tworzywa polimerowego.

### 3.2.2. Mieszalniki przepływowe

Najnowsze rozwiązania konstrukcyjne w zakresie mieszania klejów charakteryzują się tendencją do minimalizacji mieszadeł mechanicznych, w zamian czego wprowadza się urządzenia, w których mieszanie następuje dzięki wykorzystaniu energii kinetycznej strumieni mieszanych substancji. Dla takich mieszalników nazywanych mieszalnikami przepływowymi szeroko stosowana jest także nazwa mieszalników statycznych.

Ogólne tendencje do prowadzenia procesów w sposób ciągły znajdują swoje zastosowanie szeroko w technice mieszania kompozycji klejowych. Mieszalniki przepływowe charakteryzują się stosunkowo małymi gabarytami, prostą budową oraz łatwością obsługi. Dodatkową ich zaletą jest łatwość automatycznego sterowania zgodnie z wymaganiami procesu technologicznego, w którym znajdują zastosowanie.

Mieszalniki przepływowe wymagają krótszego czasu mieszania i zużywają mniej energii dla osiągnięcia tego samego efektu technologicznego. Najnowsze rozwiązania konstrukcyjne charakteryzują się tendencją do unikania mieszadeł mechanicznych, co jest realizowane dzięki stosowaniu urządzeń, w których mieszanie następuje dzięki wykorzystaniu energii kinetycznej strumieni płynów.

Wśród mieszalników przepływowych wyróżnić można dwa rodzaje konstrukcji:

- mieszalniki przepływowe bez mieszadeł mechanicznych (mieszalniki statyczne),
- mieszalniki przepływowe z mieszadłami.

W mieszalnikach statycznych proces mieszania następuje w odpowiedniej komorze dzięki burzliwości doprowadzanych strumieni płynów. Mieszalniki te mogą mieć postać zwykłej rury wyposażonej w specjalne wkładki czy też łopatki, jak w przypadku mieszadeł przepływowych. Wkładki te nazywane są „promotorami burzliwości” lub „turbulizatorami” i mogą mieć różny kształt i wymiary. Mieszalniki statyczne z takimi wkładkami mają szereg zalet w porównaniu z mieszalnikami np. mechanicznymi. Najważniejszymi zaletami są:

- ciągła praca,
- niskie koszty inwestycyjne,
- niskie koszty eksploatacyjne,
- wysoki stopień zmieszania,
- wąskie widmo czasów przebywania poszczególnych elementów cieczy,
- łatwa kontrola techniczna procesu.

Dzięki tym zaletom idealnie sprawdzają się podczas trudnych przypadków mieszania, np. podczas mieszania dwu lub więcej składników kleju o dużej lepkości.

Jak wcześniej wspomniano, w mieszalnikach statycznych stosowane są mieszadła przepływowe. Z uwagi na geometrię mieszadeł przepływowych, w mieszalnikach statycznych mieszanie następuje wskutek kolejnego dzielenia i łączenia strumienia płynu w poszczególnych elementach mieszających oraz skręcanie strugi w kolejnych elementach względem osi rury, a także jej obrotu względem osi przepływu raz w prawo raz w lewo. Dzięki temu uzyskuje się szybkie mieszanie promieniowe oraz przepływ zbliżony do tłokowego. Stopień zmieszania nie zależy zatem od natężenia przepływu, a jedynie od liczby elementów mieszających.

Przykład mieszalnika statycznego przedstawiono na rysunku 3.48.



Rys. 3.48. Przykład mieszalnika przepływowego statycznego [92]

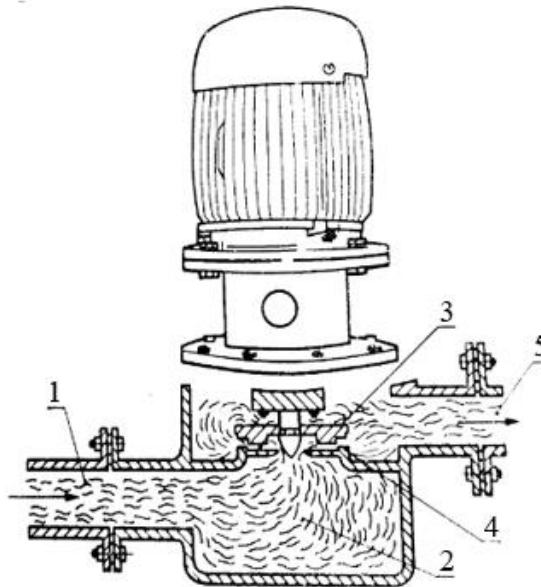
Drugim typem mieszalnika przepływowego jest mieszalnik przepływowy z mieszadłem. Mieszalnik tego typu mają odpowiednio ukształtowaną komorę przepływową zaopatrzoną w mieszadło. Przykład takiego mieszalnika przedstawiono na rysunku 3.49.



Rys. 3.49. Przykład mieszalnika przepływowego z mieszadłem mechanicznym [106]

Mieszalniki przepływowe z mieszadłem mogą być konstruowane jako urządzenia jednostopniowe lub wielostopniowe.

Zasadę działania tego rodzaju mieszalnika przedstawiono na rysunku 3.50.



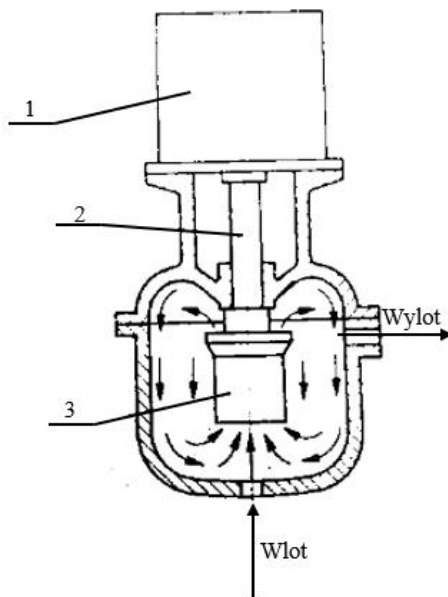
Rys. 3.50. Schemat działania mieszalnika przepływowego z mieszadłem: 1 – rura dopływowa, 2 – komora wstępnego mieszania, 3 – wirnik mieszadła, 4 – kierownica, 5 – rura odpływowa [75]

Na przedstawionym schemacie na rysunku 3.50 można zauważyć, że ciecz dopływa przewodem do komory wstępnego mieszania, a następnie przepływając

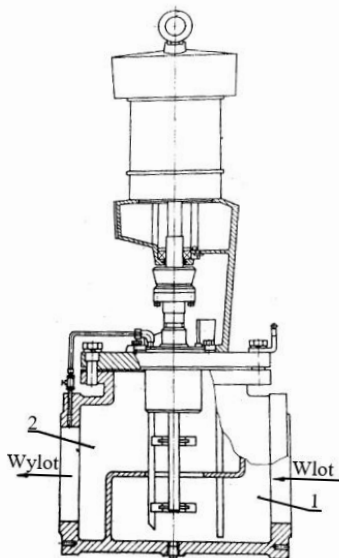
przez wirnik mieszadła wysokoobrotowego oraz kierownicę doznaje intensywnego zmieszania i odpływa przewodem.

Na kolejnym rysunku (rys. 3.51) przedstawiono schemat mieszalnika przepływowego ciągłego jednostopniowego, który zaopatrzony jest w mieszadło wytwarzające duże naprężenia ścinające wywołujące równocześnie intensywną cyrkulację cieczy w całej objętości komory mieszania.

Kolejnym przykładem mieszalnika przepływowego z mieszadłem jest mieszalnik ciągły dwustopniowy. Jego schemat przedstawiono na rysunku 3.52.



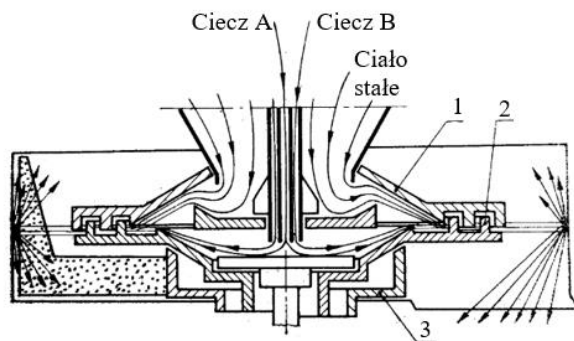
Rys. 3.51. Schemat mieszalnika przepływowego ciągłego jednostopniowego: 1 – silnik, 2 – wał, 3 – mieszadło wytwarzające duże naprężenia ścinające [75]



Rys. 3.52. Schemat mieszalnika przepływowego ciągłego dwustopniowego: 1 – pierwszy stopień, 2 – drugi stopień [75]

W mieszalniku takim jak przedstawiono na rysunku 3.52 mieszanie odbywa się w dwóch komorach zaopatrzonych w oddzielne mieszadła usytuowane na jednym wale. W innych rozwiązaniach konstrukcyjnych dopuszczane jest stosowanie oddzielnych napędów dla kolejnych stopni mieszania. W mieszalniku dwustopniowym komory połączone są ze sobą przewężeniem przekroju tak, że każde mieszadło realizuje mieszanie tylko w jednej komorze. Mieszadła w obu komorach mogą być tego samego typu lub mogą być różne.

Podczas sporządzania kompozycji klejowych do których dodawane są środki modyfikujące w postaci proszku, np. w drodze modyfikacji fizycznej, stosowane są specjalne typy mieszalników, jednak zasada działania opiera się na założeniach jak na przedstawionych przykładach. Takim mieszalnikiem dedykowanym do mieszania cieczy i proszków jest mieszalnik będący przedmiotem projektu wynalazczego [9]. Schemat tego urządzenia przedstawiono na rysunku 3.53.



Rys. 3.53. Schemat mieszalnika do mieszania cieczy i proszków: 1 – górna tarcza, 2 – dolna tarcza, 3 – zgarniacz [9]

Zasadniczą częścią przepływowego mieszalnika do cieczy i proszków są dwie obracające się w przeciwnych kierunkach tarcze. Płynne składniki oraz ciało stałe doprowadzane są na tarcz, przez które są odrzucane promieniowo, wskutek czego mieszane są ze sobą. Szczególnie intensywny proces mieszania zachodzi przy przejściu materiałów przez labirynty pomiędzy wirującymi przeciwnie tarczami. Kształt tych labiryntów może być odpowiednio dobrany dla uzyskaniażądanego efektu mieszania oraz dodatkowego rozdrabniania składników mieszaniny. Mieszanina jest odprowadzana na zewnątrz zbiornika za pomocą zgarniaczy. Lepkość cieczy mieszanych w tego rodzaju mieszalnikach może wynosić 1–50 000 mPas, wymiary cząstek ciała stałego  $10^{-4}$ –3 mm, stosunek gęstości 8:1, natomiast stosunek wagowy nawet 1:10 000.

Oprócz mieszalników o wyraźnie ukształtowanej komorze budowane są również mieszalniki bezpośrednio, np. na liniach produkcyjnych.

### 3.2.3. Mieszalniki ultradźwiękowe

Efektywne i niezawodne mieszanie jest wymagane do tworzenia klejów, aby cechowały się wysoką wydajnością. Ultradźwiękowa dyspersja i emulgacja jest używana do łączenia różnych składników w jednorodne mieszaniny klejów. Proces używania ultradźwięków, czyli sonikacja miesza nawet materiały o dużej lepkości i wysokiej zawartości nanonapełniaczy w sposób niezawodny i efektywny, tworząc jednorodne kompozycje klejowe. Ultradźwiękowe mieszalniki sprawdzają się do recepturowania różnych systemów epoksydowych umożliwiając elastyczną produkcję klejów dostosowanych do wymagań poszczególnych aplikacji, np. w linii produkcyjnej.

Wśród mieszalników ultradźwiękowych stosowanych do mieszania klejów wyróżnić można ultradźwiękowe mieszalniki wysoko ścinające.

Wysokowydajne procesory ultradźwiękowe działają jak mieszalniki o wysokim ścinaniu. Ekstremalnie wysokie siły ścinające są generowane przez kawitację ultradźwiękową i są idealne do zastosowań wsadowych i liniowych

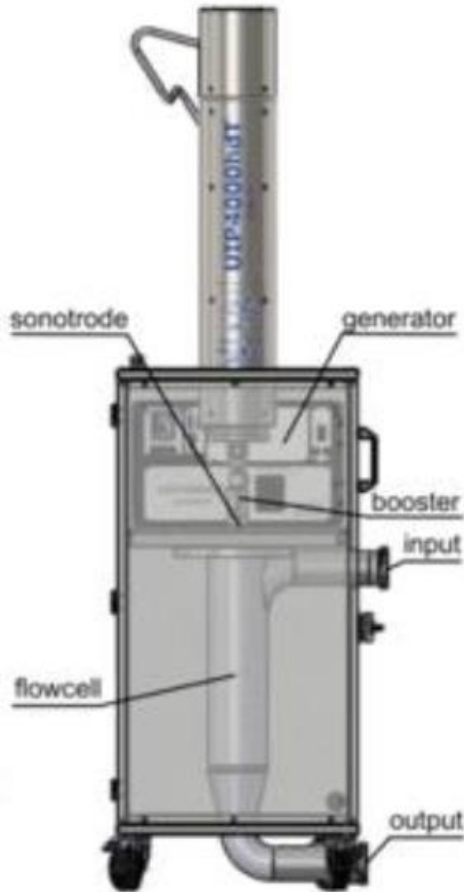


w emulgacji, dyspersji, mieleniu, deaglomeracji i homogenizacji. Dyspergatory ultradźwiękowe mogą być z łatwością stosowane do przetwarzania substancji o małym i dużym stężeniu lepkości.

Wysokie siły ścinające generowanej ultradźwiękowo kawitacji akustycznej stosowane są do wytwarzania kompozycji klejowych poddawanych fizycznym modyfikacjom. Modyfikacja fizyczna klejów realizowana jest przez wprowadzanie do żywicy różnego rodzaju napełniaczy. Dzieje się tak z uwagi na zdolności do deaglomeracji i dyspersji nanocząstek, a nawet do rozbijania cząstek pierwotnych (tj. mielenia ultradźwiękowego). Kiedy te siły ultradźwiękowe są stosowane do systemów polimerowych zawierających nanocząstki i inne wypełniacze, uzyskuje się bardzo jednolitą formułę. Dyspersja ultradźwiękowa jest metodą energooszczędną, wykazującą mniejsze zużycie energii w porównaniu z konwencjonalnymi metodami mieszania ścinającego, takimi jak mieszalniki łopatkowe, mieszalniki wirnikowe lub młyny. Schemat takiego mieszalnika przedstawiono na rysunkach 3.54, 3.55.



Rys. 3.54. Wysokowydajny homogenizator ultradźwiękowy do zastosowań mieszania produkcji firmy Hielscher [101]



Rys. 3.55. Schemat homogenizatora ultradźwiękowego do zastosowań mieszania produkcji firmy Hielscher [101]

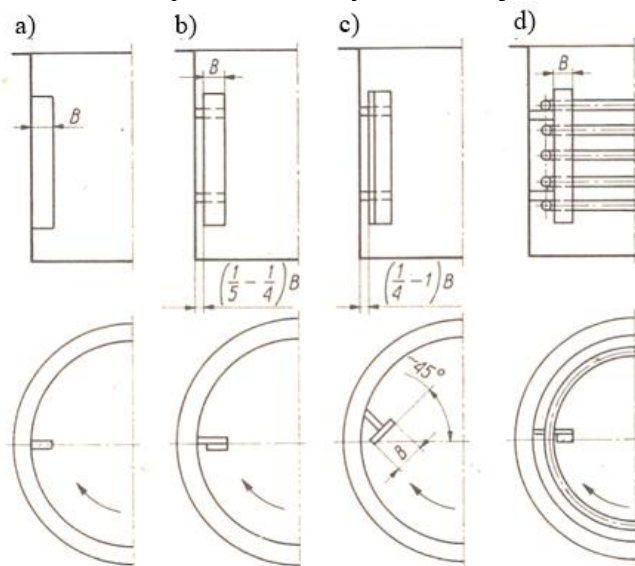
Dodatkową zaletą sonikacji w mieszalniku ultradźwiękowym, która znacznie poprawia wyniki formulacji, jest efekt odgazowania. Mieszanie mechaniczne o dużej prędkości (np. mieszadłem łopatkowym) powoduje powstawanie w mieszaninie dużej ilości pęcherzyków gazu, które w niektórych przypadkach mogą być nawet zauważone przez rozjaśnioną barwę mieszaniny oraz wpływają niekorzystnie na wytrzymałość połączenia klejowego. Ultradźwiękowe mieszanie ma zaletę, że technika sonikacji nie wprowadza gazów do formuły kleju, lecz fale ultradźwiękowe zmuszają już obecne pęcherzyki gazu do koalescencji i unoszenia się na powierzchni cieczy, skąd gaz może być łatwo usunięty. W ten sposób ultradźwięki sprzyjają odgazowaniu i odpowietrzeniu cieczy i substancji klejących.

Wśród mieszalników ultradźwiękowych występują także ultradźwiękowe mieszadła zbiornikowe, gdzie zastosowanie znajdują mieszadła opisane w punkcie 3.1.3.

### 3.3. Zbiorniki mieszalników

Istnieje wiele typów zbiorników mieszalników różniących się między sobą kształtem oraz rodzajem wyposażenia. Podyktowane jest to względami technologicznymi, a co za tym idzie odpowiednimi parametrami pracy aparatu (ciśnienie, odporność chemiczna tworzywa, osprzęt, intensywność mieszania). Zbiorniki mieszalnika mają zwykle kształt cylindryczny oraz dno płaskie lub wypukłe o różnym kształcie (stożkowe, elipsoidalne, półsferyczne). Jak również są najczęściej ustawiane pionowo, rzadziej poziomo. Wewnątrz zbiornika mogą być zabudowane przegrody dla uniknięcia wirowania cieczy w mieszalniku oraz tworzenia się leja.

Wymiary przegród są na ogół następujące: liczba przegród  $J = 2-6$ , szerokość  $B = (1/12-1/10) \cdot D$ . Najczęściej stosowana jest liczba przegród  $J = 4$ . Dla dużych mieszalników o średnicy  $D > 4$  m jest zalecane stosowanie większej liczby przegród  $J = 6$ . Na rysunku 3.56 przedstawiono sposoby usytuowania przegród w zależności od lepkości mieszanych substancji.



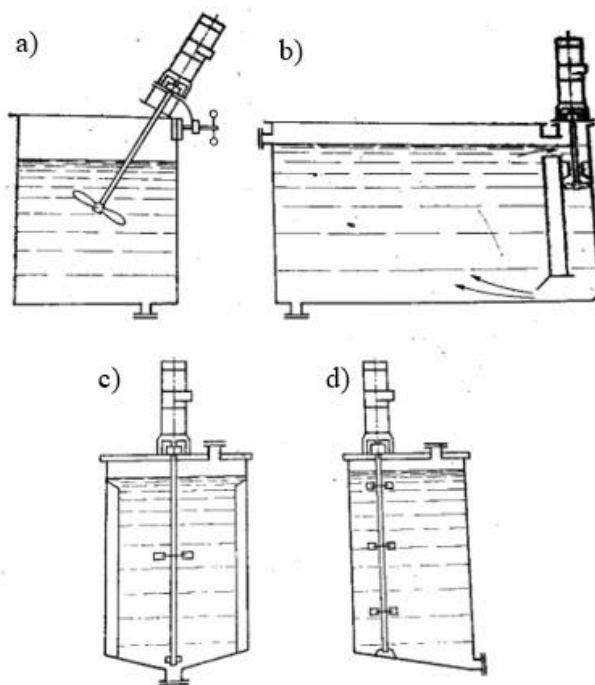
Rys. 3.56. Sposoby usytuowania przegród: a) dla cieczy o małych lepkościach, b) dla cieczy o średnich lepkościach, c) dla cieczy o dużych lepkościach, d) dla zbiorników z wężownicą [75]

Przegrody mogą być umieszczone przy samej ścianie zbiornika mieszalnika, bądź też w pewnej od niej odległości. Mogą być także usytuowane pod pewnym kątem względem promienia obrotu mieszadła, albo mogą być pełnej długości lub tylko na pewnej głębokości cieczy. Przedstawione na rysunku 3.56a usytuowanie przegród stosuje się dla cieczy o małych lepkościach, zbliżonych do lepkości wody, usytuowanie zaprezentowane na rysunku 3.56b dla cieczy o umiarkowanych lepkościach, czyli 7 000–10 000 mPas [41]. Dla cieczy o średniej lepkości rozwiązanie przedstawione na rysunku 3.56a powodowałoby zastoje cieczy wokół przegrody. Dla cieczy o lepkościach powyżej 50 Pa·s nie powinno się stosować w ogóle przegród. Jeśli w mieszalniku znajduje się wężownica spiralna wówczas zalecane jest umieszczanie przegrody wewnątrz wężownicy. W tym przypadku przegrody mogą służyć równocześnie jako konstrukcja podtrzymująca wężownicę.

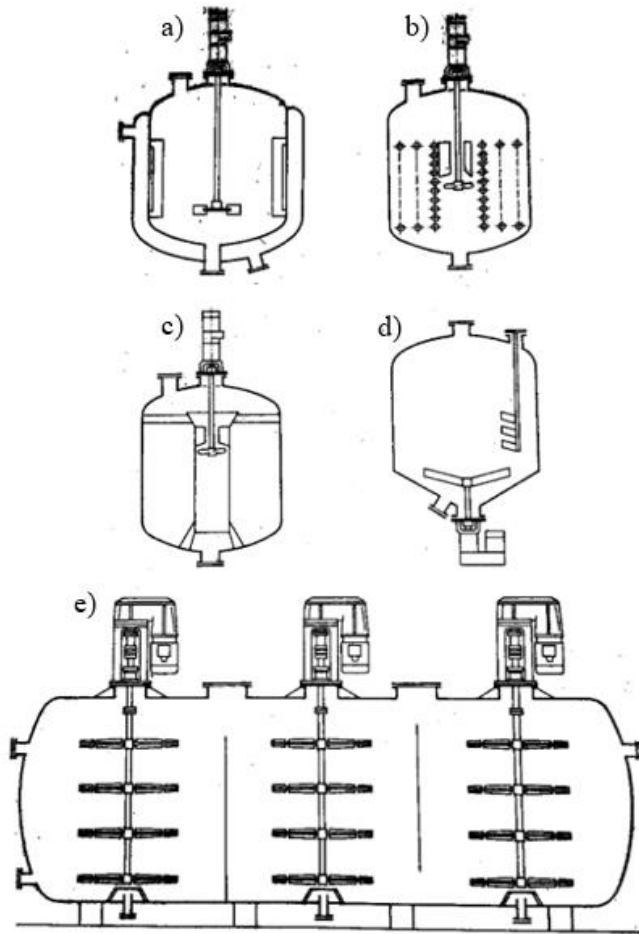
Wśród zbiorników mieszalników występują również zbiorniki prostokątne. Cechują się one szeregiem zalet, między innymi prosta i tania budowa, dobre wykorzystanie objętości, a ze względu na swój kształt nie wymagają przegród. Z tych względów powinny być stosowane, jeśli to jest możliwe ze względów technologicznych, np. dla procesów przebiegających pod ciśnieniem atmosferycznym.

Na rysunkach poniżej (rys. 3.57–3.59) przedstawiono przekroje różnych typów zbiorników wraz z mieszadłami. Wybór odpowiedniego typu zbiornika odbywa się na zasadzie doświadczenia projektowego, bieżących potrzeb lub też, co ma miejsce w przypadku dużych mieszalników – na podstawie rachunki ekonomicznego. Dość często zastosowanie znajdują zbiorniki cylindryczne z przegradami usytuowanymi pionowo z napędem górnym mieszadła oraz średnicy  $D$  równej głębokości cieczy w mieszalniku  $H$ , czyli o smukłości  $H/D = 1$ . Zbiorniki usytuowane pionowo o małej smukłości  $H/D \leq 1$  stosowane są dla bardzo dużych objętości, np. w przedsiębiorstwach produkujących mieszanki klejowe. Zbiorniki o dużej smukłości  $H/D \geq 1$  mają szczególnie zastosowanie do procesów ciągłych, np. w przedsiębiorstwach gdzie proces klejenia jest etapem procesu produkcyjnego.

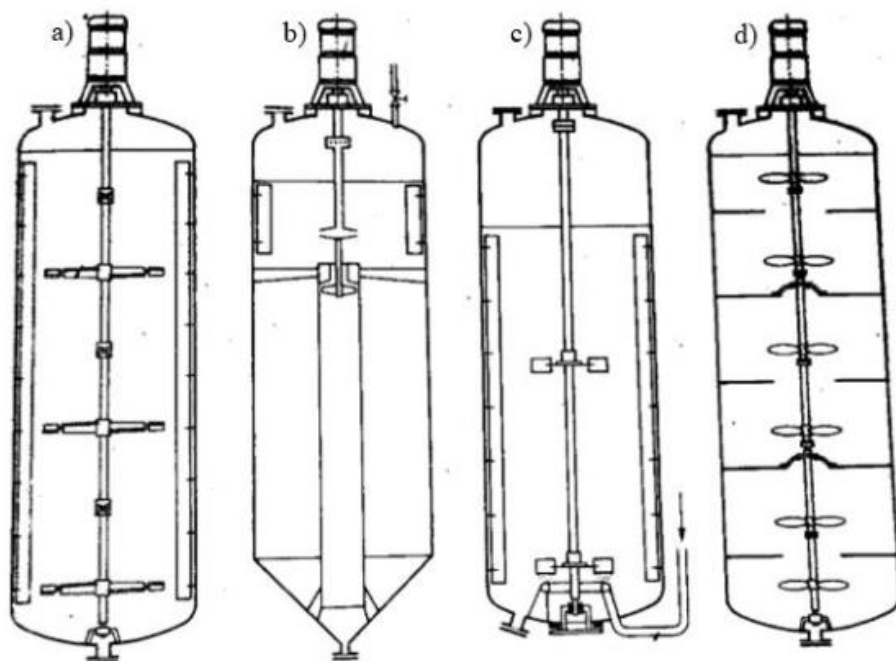
Tendencje rozwojowe mieszalników wskazują nadal, że wzrost objętości urządzenia powoduje zmniejszenie kosztów jednostkowych procesu.



Rys. 3.57. Przekroje zbiorników mieszalników pracujących przy ciśnieniu atmosferycznym: a, c, d) zbiorniki pionowe z różnym wyposażeniem, b) zbiornik poziomy prostokątny [75]



Rys. 3.58. Przekrój zbiornika mieszalnika pracujące pod ciśnieniem znacznie różnym od atmosferycznego: a, b, c, d) zbiorniki pionowe o różnym wyposażeniu, e) zbiornik leżący dla dużych objętości cieczy [75]



Rys. 3.59. Przekrój kolumny z mieszadłami: a) kolumna z mieszadłami dla cieczy o dużej lepkości do 100 Pas, b) kolumna z rurą cyrkulacyjną i mieszadłem śmigłowym, c) kolumna z mieszadłami turbinowymi, d) kolumna z mieszadłami śmigłowymi oraz przegrodami [75]



Na rysunkach 3.60, 3.61 przedstawiono także pogładowe zdjęcia obrazujące przykłady zbiorników znajdujących zastosowanie w przemyśle produkcyjnym.



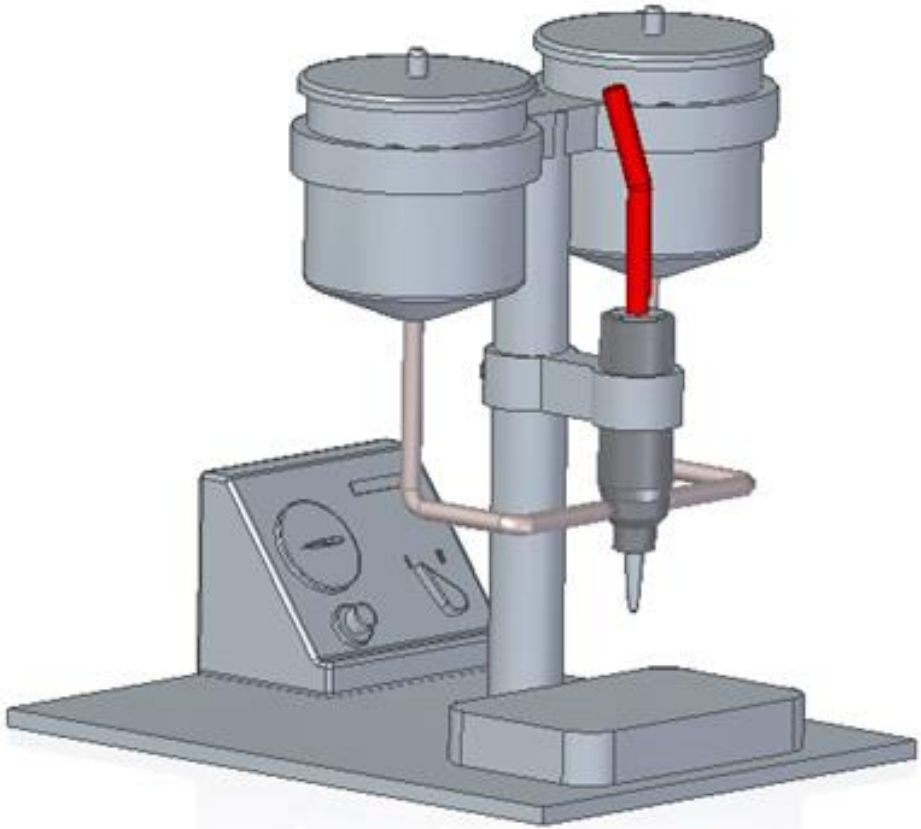
**Rys. 3.60. Mieszalnik przygotowawczy do kleju i domieszek MC 250-150 produkcji Osama [110]**



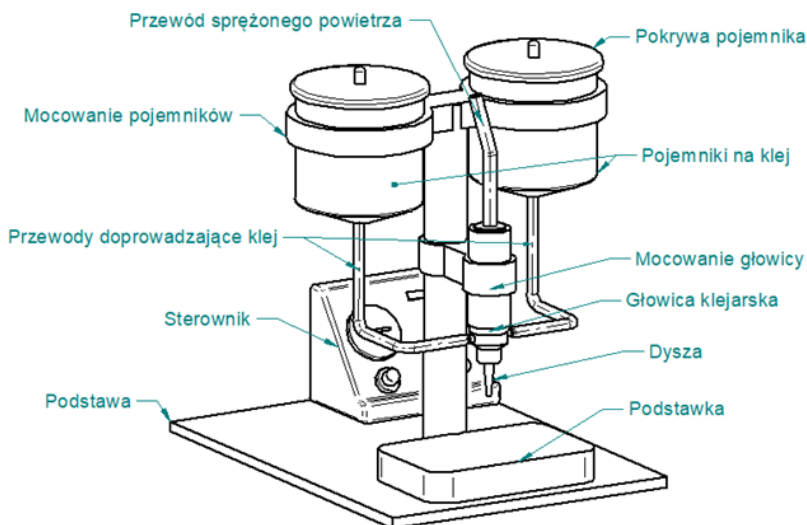
**Rys. 3.61. Mieszalnik klejów MIX60 produkcji Imer [89]**

Jak można zauważyć, zbiorniki mieszadeł mogą mieć różny kształt, wymiary i konstrukcję, która zależy od potrzeb konsumentów. Dlatego też nie jest możliwe, aby opisać wszystkie dostępne na rynku rozwiązania konstrukcyjne w tym zakresie. Jednak zarówno w dziedzinie mieszania kompozycji klejowych, jak i w przypadku mieszania innych związków chemicznych czy substancji różnego rodzaju, prowadzone są szeregi prac doświadczalnych oraz teoretycznych nad zwiększaniem objętości zbiorników mieszalników oraz nad zmianami konstrukcyjnym samych mieszalników [22, 54].

Jak już wspomniano konstrukcja zbiornika jak i całego mieszadła zależy od kilku czynników. Dlatego też w zastosowaniach przemysłowych przeznaczenie znajdują także urządzenia służące do jednoczesnego mieszania i nakładania klejów. Urządzenia takie często również poddawane są modyfikacjom na szczególne potrzeby użytkowników. Jedno z takich urządzeń zostało przedstawione i opisane w publikacji [66]. Urządzenie to zostało przedstawione na rysunkach 3.62 i 3.63.



Rys. 3.62. Model 3D urządzenia do mieszania i nakładania kleju [66]



Rys. 3.63. Schemat ogólny do mieszania i nakładania kleju [66]

W opisanym urządzeniu czynność mieszania kleju odbywa się w dyszy dozującej. Specjalna konstrukcja dyszy pozwala na odpowiednie mieszanie klejów dwuskładnikowych bezpośrednio przed samą operacją dozowania oraz nanoszenia kleju na łączone powierzchnie. Pozwala to na znaczne skrócenie czasu klejenia poprzez wyeliminowanie dodatkowej operacji związanej z przygotowaniem kleju. Jednak takie rozwiązania są w zasadzie stosowane tylko do takich materiałów, które mają bardzo krótki czas życia. Klej, który spływa z pojemników jest przetłaczany za pomocą tłoczka znajdującego się w głowicy klejarskiej, który napędzany jest sprężonym powietrzem dostarczonym z kompresora do głowicy. Klej z odpowiednim ciśnieniem wpływa do dyszy dozująco-mieszającej, gdzie jest mieszany przed mieszadło umieszczone w dyszy dozującej. Niewielkie wymiary gabarytowe przedstawionego urządzenia są jego atutem, ponieważ zajmuje bardzo mało miejsca w odpowiednio zagospodarowanych przestrzeniach warsztatowych oraz produkcyjnych.

## 4. Napędy mieszalników

Napęd mieszalnika umożliwia ruch roboczy narzędzia, czyli mieszadła. Pod pojęciem napęd, czy też układ napędowy mieszalnika rozumieć należy urządzenie, w skład którego wchodzi: wał, przekładnia, silnik napędowy oraz urządzenia regulujące pracę całości [62]. Układ napędowy powinien się odznaczać z jednej strony wysoką sprawnością energetyczną, z drugiej prostotą budowy i łatwością obsługi. W zależności od stawianych wymagań układ napędowy może być sterowany ręcznie lub automatycznie.

Warunki mechaniczne pracy napędów mieszadeł są łatwiejsze niż w przypadku napędów innych maszyn (np. obrabiarek, maszyn technologicznych, itp.). Zdecydowana większość mieszadeł pracuje bowiem ze stałą prędkością obwodową oraz bez gwałtownych zmian obciążenia, co dodatnio wpływa zarówno na sprawność napędu, jak i jego żywotność. Negatywny wpływ na napęd wywiera natomiast samo środowisko chemiczne, na działanie którego jest narażony. Pociąga to za sobą konieczność stosowania jako materiału konstrukcyjnego tworzyw odpornych na korozję, co w znacznym stopniu może zwiększyć koszt całego napędu. W niektórych technologiach istnieje również niebezpieczeństwo wybuchu łatwopalnych substancji, co wymaga z kolei zastosowania specjalnych rozwiązań silników napędowych.

### 4.1. Wał mieszadła

Projektowanie wałów do przenoszenia mocy jest znane od dawna. W zastosowaniach praktycznych stosuje się dwa typy wałów – pełne i wydrążone. Wytrzymałość na zginanie i skręcanie wału wydrążonego jest niewiele mniejsza niż wału pełnego ze względu na to, że warstwy zewnętrzne wału biorą głównie udział w przenoszeniu obu rodzajów naprężeń.

Istotnym elementem przy wyborze jednego z powyższych typów wałów jest materiał, z którego wał ma być wykonany. Jeżeli materiałem konstrukcyjnym jest zwykła stal węglowa, wykonuje się najczęściej wał pełny, natomiast gdy ze względu na środowisko korozyjne należy użyć stali kwasoodpornej, wykonuje się wały wydrążone, przez co osiąga się oszczędność kosztów ze względu na obecnie wysoką cenę materiału konstrukcyjnego.

Projektowanie mechaniczne wału obejmuje obliczenie średnicy wału ze względu na przenoszoną moc oraz sprawdzenie czy wał nie obraca się z prędkością zbliżoną do prędkości krytycznej. Obliczenie średnicy wału jest stosunkowo proste, trudniej jest natomiast określić jego wartość krytyczną. Wskutek niedokładnego wyważenia układu wał-wirnik w przypadku usytuowania pionowego, a także z powodu ugięcia tego układu pod własnym ciężarem w przypadku usytuowania poziomego lub ukośnego, w czasie obrotów wału powstaje siła odśrodkowa, pod działaniem której następuje ugięcie dynamiczne sumujące się

z odchyleniem statycznym środka ciężkości układu. Przy wzroście częstości obrotów siła odśrodkowa, a więc i ugięcie wzrastają. Częstość obrotów, przy której ugięcie teoretyczne wału byłoby nieskończenie wielkie, jest nazywane częstością krytyczną obrotów [30, 75]. Przy tej częstości drgania giętne wału są w rezonansie z jego drganiami własnymi. Po przekroczeniu tej częstości następuje znowu równomierna praca wału. Dla wału „nieważkiego” z osadzonym na nim mieszadłem o pewnym ciężarze istnieje jedna częstość krytyczna obrotów, dla wałów rzeczywistych z osadzonymi na nich mieszadłami istnieją częstości krytyczne wyższego rzędu, przy czym amplitudy wychyleń są już znacznie mniejsze. Częstość krytyczna zależy od długości i prostoliniowości wału, jego ciężaru oraz ciężaru wirników. Istotnym czynnikiem jest również wzajemna proporcja długości tej części wału, która znajduje się między łożyskami, do długości nie łożyskowanej, a także odstępy między wirnikami na wale. Częstość krytyczna nie zależy natomiast od usytuowania wału.

Duże znaczenie dla prawidłowej pracy wału ma jego prostoliniowość. Przyjmuje się, że wyboczenie wałów pracujących w zalecanych zakresach częstości obrotów nie powinno przekraczać 0,5 mm/m, natomiast dla wałów pracujących przy częstościach obrotów zbliżonych do krytycznych wyboczenie nie może przekraczać 0,8 mm/m.

Jeżeli długość wału musi być większa niż dopuszczalna ze względu na obroty krytyczne, instaluje się dodatkowe stabilizatory w postaci skrzydeł lub pierścienia przymocowanego bezpośrednio do mieszadła. Pierścień taki może być umocowany za pomocą szprych oraz oddzielnej piasty wprost na wale w pobliżu mieszadła. Inną metodą jest dodatkowe łożyskowanie wału na dnie mieszalnika lub w górnej jego części. Najprostszym rozwiązaniem, jeśli nie przeszkadzają inne względy technologiczne jest dolne lub boczne ulokowanie napędu względem zbiornika, przez co można skrócić znacznie długość wału. Ten typ lokalizacji napędu wiąże się jednak z koniecznością dokładnego uszczelnienia.

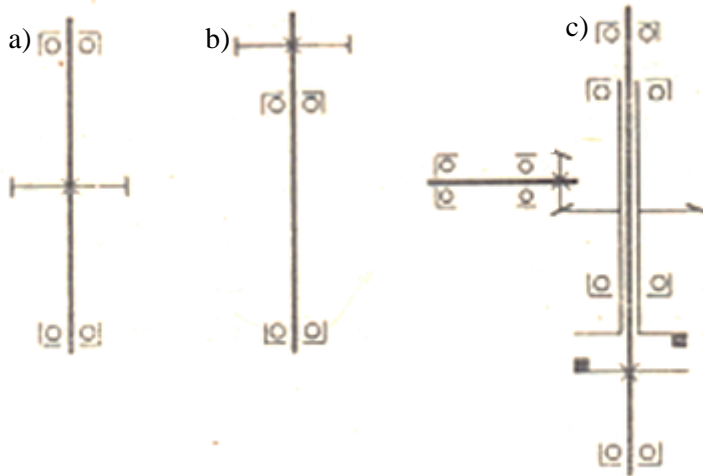
## 4.2. Łączenie wałów

Podczas projektowania mieszadeł producenci muszą dokonać wyboru sposobu połączenia wału mieszadła z wałem napędu. Złącze takie musi zapewnić zdolność przenoszenia momentu obrotowego, naprężeń pionowych związanych z ciężarem wału i wirnikiem, a także współosiowości obu wałów. Wał napędu łączy się z wałem mieszadła za pomocą sprzęgła sztywnego lub elastycznego. Połączenie elastyczne jest korzystniejsze z uwagi to, że przy tym rozwiązaniu występują mniejsze uderzenia momentu obrotowego z wału mieszadła na wał napędu i odwrotnie. Często zastosowanie znajdują sprzęgła tulejowe sprężyste. Olej pod dużym ciśnieniem jest wtłaczany kanałami między dokładnie obrobione powierzchnie styku czopów wałów i tulei łączącej. Ciśnienie oleju powoduje odkształcenie sprężyste tulei, a działające w tym samym czasie siły poosiowe na wały powodują przesunięcie poosiowe tych wałów względem tulei. Po zredu-

kowaniu ciśnienia oleju, siły sprężystości materiału tulei powodują bardzo silnej zaciśnięcie na czopach wałów. Powstaje w ten sposób złącze sztywne, umożliwiające przenoszenie dużych momentów skręcających.

### 4.3. Łożyskowanie i uszczelnienia wałów

Łożyskowanie wału jest niezbędne, aby była możliwość wykonywania ruchu obrotowego części roboczej. Na rysunku 4.1 przedstawiono schematycznie różne sposoby łożyskowania wału.



Rys. 4.1. Różne sposoby łożyskowania wału [75]

W przypadku gdy wał wyjściowy przekładni jest wałem mieszadła, łożyska umieszcza się nad i pod przekładnią, albo też oba łożyska pod przekładnią. Na rysunku 4.1c przedstawiono również przykład niezależnego łożyskowania wału napędu i wału mieszadła. Wydrążony wał przekładni oraz znajdujący się w nim wał mieszadła są połączone sprężem elastycznym.

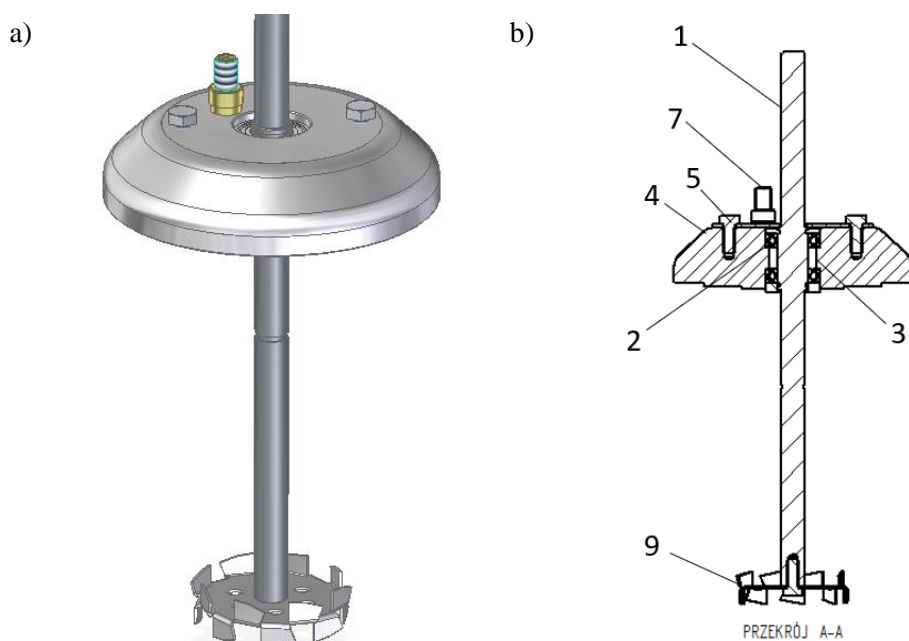
Podczas pracy mieszalnika bardzo ważne jest uszczelnienie. Uszczelnienie wału ma na celu oddzielenie wnętrza mieszalnika od otoczenia. O wyborze odpowiedniego typu uszczelnienia decyduje: ciśnienie, temperatura i korozyjność w przestrzeni roboczej mieszalnika oraz prędkość obwodowa wału.

Spośród wielu typów uszczelnień znanych w przemyśle, do mieszalników stosuje się zwykle:

- dławnice z uszczelnieniem plastycznym,
- dławnice z uszczelnieniem ślizgowym,
- dławnice z uszczelnieniem czołowym ślizgowym.

Do wysokich ciśnień stosuje się uszczelnienia podwójne. Dla mieszalników szczególnie korzystne jest koncentryczne rozmieszczenie pierścieni, które nie wymaga powiększenia długości wału. Najczęściej obecnie stosowane są uszczelnienia czołowe ślizgowe. Uszczelnienie w nich zachodzi na styku czołowym dwóch pierścieni, z których jeden jest nieruchomy, drugi obraca się wraz z wałem, przy czym przynajmniej jeden z tych pierścieni musi mieć możliwość przesuwu wzdłużnego (osiowego). Pierścienie są dociskane do siebie pod wpływem ciśnienia oraz dodatkowo za pomocą sprężyny spiralnej.

Rozwiązania dotyczące uszczelniania wałów często są modyfikowane. Jednym z przykładów jakiej modyfikacji może być zastosowanie dodatkowej pokrywy oddzielającej napęd od mieszadła przedstawionej na rysunku 4.2.



**Rys. 4.2. Mieszadło z pokrywą uszczelniającą a) widok ogólny, b) przekrój, gdzie: 1 – trzpień (wał), 2 – łożyska kulkowe, 3 – uszczelnienie łożysk kulkowych, 4 – pokrywa, 5 – śruba, 7 – zawór odpowietrzający, 9 – mieszadło [54]**

Urządzenie przedstawione na rysunku 4.2 może być montowane w napędzie mieszalnika, jak było przedstawione na rysunku 3.47. Pokrywa oraz zastosowane łożyska z uszczelnieniem pozwalają zachować szczelność układu podczas mieszania kleju.



#### 4.4. Przekładnie

Ogólnie przekładnią nazywa się urządzenie do przenoszenia mocy z silnika napędowego na wał napędzanej maszyny przy równoczesnej redukcji obrotów.

W konstrukcjach mieszalników najczęściej stosowane są:

- przekładnie pasowe,
  - przekładnie na paski klinowe,
  - przekładnie pasowe zębate,
  - przekładnie z zębami śrubowymi,
- przekładnie ślimakowe.

Konstrukcja przekładni pasowych należy chyba do najstarszych, jednak nadal są powszechnie stosowane dzięki prostocie konstrukcji. Przekładnie pasowe stosowane są do silników elektrycznych małej i średniej mocy (500–1000 obr/min) [75]. Przenoszona przez przekładnię siła obwodowa jest tym większa, im większy jest kąt opasania jej kół. Kąt ten można zwiększyć przez zainstalowanie dodatkowych urządzeń naprężających pas. Z reguły przełożenie dla tego typu przekładni nie może przekraczać stosunku 1:10. W przypadku, gdy ze względu na przenoszoną moc szerokość pasa jest dość znaczna, następuje uginanie wału, co pociąga za sobą konieczność dwustronnego łożyskowania wału. Mankamentem tego rodzaju przekładni jest konieczność dokładnego równoległego ustawienia obu wałów, aby zapobiec przesuwaniu się pasa na jedną krawędź koła. Sprawność przekładni pasowych zależy w dużym stopniu od stopnia zużycia pasów. Modyfikacją przekładni pasowych są przekładnie na paski klinowe. Zastosowanie pasków klinowych umożliwia znaczne zmniejszenie odległości między kołami, jeśli zaś montaż został przeprowadzony poprawnie, nie zachodzi potrzeba zastosowania dodatkowych urządzeń naprężających. W zależności od warunków pracy napędu są używane paski pojedyncze lub równoległe. Tego typu przekładnie stosuje się do mieszadeł wysokoobrotowych.

W celu zwiększenia przenoszonej mocy oraz wyeliminowania poślizgu stosowane są także przekładnie pasowe zębate oraz bardziej stabilną wersję – przekładnie z zębami śrubowymi. Przekładnia z zębami śrubowymi dają płynny bieg mieszadła, gdyż ociążenie jest stopniowo przekazywane z zęba na ząb. Zdolność do przenoszenia mocy przez przekładnię jest wtedy o wiele większa, a ponadto przekładnia może być eksploatowana przy znacznie większych częstościach obrotów.

Przekładnie ślimakowe stosuje się w przypadkach, gdy wały mieszadła i silnika leżą w prostopadłych płaszczyznach. Zaletą tego typu przekładni jest cichobieżność oraz możliwość znacznej redukcji obrotów, co jednak w znacznym stopniu wpływa na zmniejszenie sprawności. W praktyce spotyka się często napędy kombinowane, gdzie współpracują ze sobą różne typy przekładni. W przypadku mieszadeł kombinowanych, składających się z dwóch współosio-

wych wałów obracających się w przeciwnych kierunkach z różną prędkością, stosuje się układ przekładni zębatych stożkowych.

O doborze odpowiedniego typu przekładni decyduje przenoszona moc, stopień redukcji obrotów, jak również samo usytuowanie napędu względem mieszadła.

Przekładnie pasowe można stosować przy średnich i małych mocach, ale przy niewielkiej redukcji obrotów. Przekładnie zębate umożliwiają uzyskanie większej redukcji obrotów, a także zwartą budowę napędu. Wadą ich jest jednak znaczny hałas podczas pracy. Kombinowany układ przekładni stosuje się zwykle wtedy, gdy zachodzi konieczność poziomego usytuowania silnika napędowego.

## 4.5. Silniki napędowe

Silnikami napędowymi w mieszadłach są: silniki elektryczne, silniki hydrauliczne lub pneumatyczne.

Silniki elektryczne asynchroniczne trójfazowe klatkowe stanowią najbardziej popularny typ silnika napędowego małej i średniej mocy ze względu na prostą konstrukcję i wytrzymałą budowę wirnika oraz relatywnie niską cenę.

Uzwojenie wirnika stanowią pręty miedziane lub aluminiowe gołe umieszczone w żłobkach i zwarte po obu stronach rdzenia wirnika spawanym pierścieniem. Powstaje w ten sposób klatka stanowiąca wielofazowe uzwojenie zwarte, w którym indukowane są stosunkowo małe napięcia natomiast duże prądy. Aluminiowa klatka może być odlana w całości wraz ze skrzydełkami wentylacyjnymi. Wadą tych silników jest duży prąd rozruchowy przy bezpośrednim włączaniu do sieci, równy 5–7-krotnej wartości prądu znamionowego, natomiast moment rozruchowy wynosi tylko 0,9–1,5 momentu znamionowego [75].

Powyższych wad nie mają silniki asynchroniczne pierścieniowe, dla których prąd rozruchowy nie przekracza dwukrotnej wartości prądu znamionowego.

Regulację obrotów w silnikach obu rodzajów uzyskuje się poprzez:

- zmianę częstotliwości prądu zasilającego,
- zmianę liczby biegunów w stojanie,
- zastosowanie opornika w obwodzie wirnika.

Zmiana częstotliwości prądu zasilającego wymaga zainstalowania dodatkowej przetwornicy, przez co sposób ten jest raczej nieekonomiczny. Najczęściej stosowana jest druga metoda. Stosowane są silniki asynchroniczne z przełączaną liczbą biegunów w stojanie, przez co uzyskuje się kilka częstości obrotów silnika, zmienianych jednak w sposób skokowy. Płynną regulację obrotów uzyskuje się przez zmianę oporu w obwodzie. Ponieważ moment obrotowy silnika asynchronicznego zależy od kwadratu napięcia zasilającego, zaś moment obrotowy mieszadła jest proporcjonalny do kwadratu jego obrotów, uzyskuje się prostą zależność pomiędzy obrotami mieszadła a oporem w obwodzie wirnika. Jednak skutek tego spada gwałtownie sprawność silnika.

Typ budowy zewnętrznej silnika zależy od warunków w jakich silnik ma pracować. W przemyśle chemicznym przy produkcji klejów silniki elektryczne pracują często w warunkach ewentualnego niebezpieczeństwa wybuchu. Różnią się trzy stopnie niebezpieczeństwa:

- stopień a – dla pomieszczeń w których niebezpieczeństwo wybuchu nie istnieje,
- stopień b – dla pomieszczeń, w których istnieje możliwość tworzenia się mieszanin wybuchowych, lecz obecność ich w normalnych warunkach przewietrzenia jest daleka od granic niebezpieczeństwa,
- stopień c – dla pomieszczeń, w których istnieje stale możliwość tworzenia się mieszanin wybuchowych w ilości niebezpiecznej.

Dla stopnia niebezpieczeństwa b stosuje się budowę wzmocnioną, wytrzymałą określoną ciśnienie w razie wybuchu wewnątrz silnika. Przy osłonie szczelnej wewnątrz silnika ma połączenie z otoczeniem tylko w tych miejscach, w których części ruchome przechodzą na zewnątrz silnika, przy czym szerokość szczeliny zależy od zastosowania silnika.

W pomieszczeniach o bardzo wysokim stopniu niebezpieczeństwa stosuje się silniki wypełnione gazem obojętnym lub też z ciągłym przepływem powietrza czystego. Koszt silników ognioszczelnych ze wzmocnioną budową jest znacznie wyższy niż zwykłych silników asynchronicznych zwartych lub pierścieniowych o budowie otwartej.

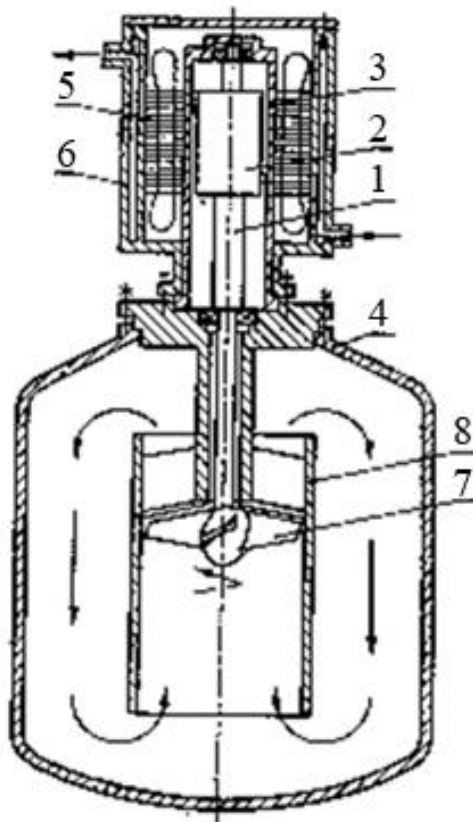
Dla płynnej regulacji częstości obrotów mieszadła stosuje się silniki prądu stałego. Są to silniki: szeregowe, bocznikowe lub bocznikowo-szeregowe. Regulacja płynna ma szczególne znaczenie przy zastosowaniu automatycznym napędu mieszalnika bez udziału obsługi. Z uwagi na tendencję automatyzacji procesów przemysłowych napędy takie znajdują najczęściej zastosowanie.

Częste zastosowanie w mieszalnikach znajduje także hydrauliczny system napędu, szczególnie wtedy gdy przenoszone są znaczne obciążenia przy niewielkich szybkościach obrotów. Dzięki zastosowaniu silnika hydraulicznego nie ma konieczności instalowania przekładni, co wpływa korzystnie na zmianę zarówno ciężaru jak i kosztu urządzenia. Regulacja obrotów takiego silnika jest o wiele łatwiejsza niż silników elektrycznych. Pożądaną częstość obrotów i moc uzyskuje się przez regulację przepływu płynu zaworem umieszczonym na boczniku podłączonym do pompy równolegle do silnika hydraulicznego.

Silniki pneumatyczne mają te same zalety co silniki hydrauliczne, jednak uzyskiwana przez nie moc jest mniejsza. Oba typu silników nadają się do pracy w warunkach szczególnie niebezpiecznych pod względem wybuchowym. Koszty eksploatacji jednak tych silników są wyższe niż silników elektrycznych.

#### 4.6. Hermetyczne układy napędowe

W przypadku wysokich ciśnień roboczych w mieszalniku oraz dla dużych średnic wału i częstości obrotów nie można wykonać uszczelnienia dławnicowego wału ze względu na znaczne straty mocy wynikłe wskutek tarcia w dławnicy. W takich przypadkach stosuje się elektryczny silnik asynchroniczny ekranowy, tzw. hermetyczny układ napędowy. Ekranowy silnik elektryczny wbudowany w mieszalnik stanowi składową jego część i dlatego może pracować praktycznie pod dowolnym ciśnieniem. Napędy tego typu są proste w eksploatacji oraz mogą pracować przy dużych częstościach obrotów. Na rysunku 4.3 przedstawiono schemat hermetycznego układu napędowego mieszadła.



Rys. 4.3. Hermetyczny układ napędowy mieszadła: 1 – wał mieszadła, 2 – wirnik silnika, 3 – tuleja ekranująca, 4 – zbiornik mieszadła, 5 – stojan, 6 – obudowa zewnętrzna, 7 – mieszadło, 8 – dyfuzor [75]

Silnik ekranowy stanowi odpowiednio zmodyfikowany silnik asynchroniczny prądu zmiennego, przy czym w szczelinie między stojanem a wirnikiem jest wbudowana cienkościenna tuleja ekranująca, która hermetyzuje przestrzeń mieszalnika. Strumień magnetyczny wytwarzany przez stojan przenika przez tuleję do wirnika. Tuleja jest odporna na ciśnienie w zakresie 1–2,5 MPa. Jeśli ciśnienie jest wyższe, z przeciwnej strony tulei wytwarza się odpowiednie przeciwcisnienie za pośrednictwem gazu obojętnego lub oleju. W tym przypadku stojan silnika obudowany pancierzem ciśnieniowym, wytwarzającym odpowiednio wysokie ciśnienie, jest zaopatrzony w dodatkowy płaszcz chłodzący.

Napędy tego typu pozwalają stosować podczas mieszania wysokie ciśnienie oraz duże częstotliwości obrotowe, bez większych ograniczeń.

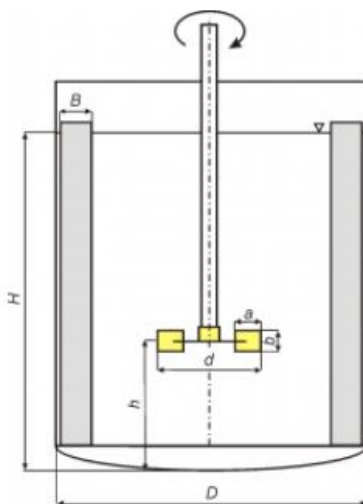
## 5. Wpływ parametrów geometrycznych mieszalnika na moc mieszadeł

Wpływ parametrów geometrycznych mieszalnika na moc mieszania uzależniony jest przede wszystkim od geometrii zastosowanego mieszadła. Różne parametry geometryczne układu mieszadło-zbiornik wpływają różnie na moc mieszania. Niektóre z nich mają znaczny wpływ, jak np. przegrody, szerokość i pochylenie powierzchni natarcia mieszadła, inne mniejszy, jak np. średnica zbiornika, wysokość zawieszenia mieszadła od dna zbiornika. Poniżej omówiono wpływ podstawowych parametrów geometrycznych najczęściej stosowanych mieszadeł mechanicznych do produkcji kompozycji klejowych na moc mieszadła.

### 5.1. Wpływ parametrów geometrycznych mieszalnika na moc mieszadeł turbinowych

W literaturze nielicznie opisywane są wyniki badań, które obejmują tematykę związaną z wpływem geometrii mieszadła na właściwości uzyskiwanych mieszanin. Autorzy prac w swoich pracach [11, 73] przedstawiają wnioski, z których wynika, że wraz ze wzrostem liczby łopatek mieszadła turbinowego wzrasta jego moc mieszania.

Dla lepszego zobrazowania opisywanych poniżej parametrów konstrukcji mieszadeł na rysunku 5.1 zamieszczono schemat geometrii mieszalnika.



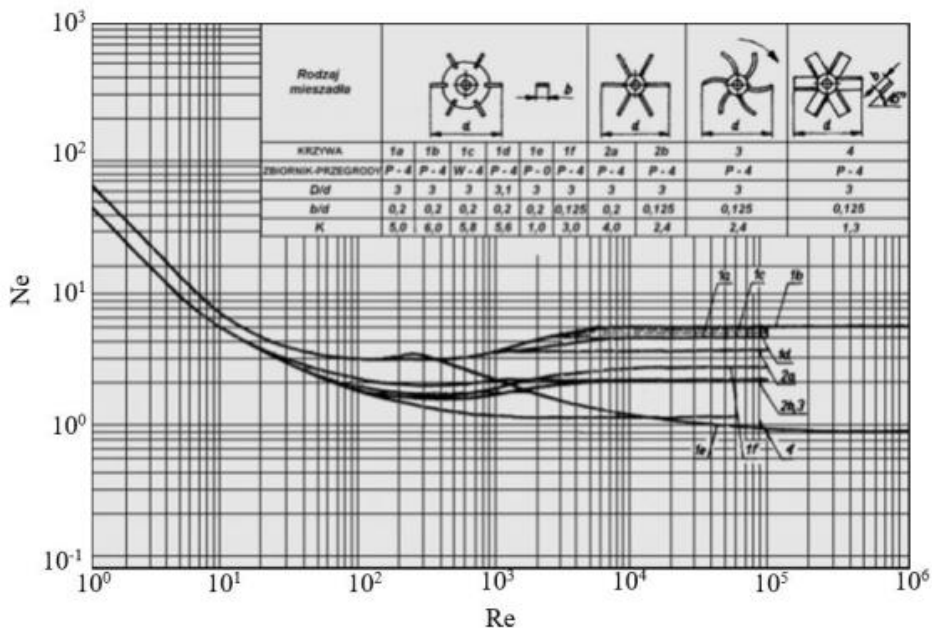
Rys. 5.1. Budowa mieszalnika, gdzie:  $d$  – średnica mieszadła,  $D$  – średnica mieszalnika,  $H$  – wysokość słupa cieczy,  $B$  – szerokość przegrody,  $h$  – wysokość zawieszenia mieszadła,  $a$  – szerokość łopatki mieszadła,  $b$  – wysokość łopatki mieszadła [88]

Według opisywanych wyników badań wzrost liczby łopatek od 3 do 6 powoduje w przybliżeniu wzrost mocy o około 74%. Dalsze zwiększanie ilości łopatek mieszadła powoduje mniejszy wzrost mocy mieszania. Dlatego też obecnie liczba łopatek  $Z = 6$  jest standardowym rozwiązaniem.

Wymiary łopatki mieszadła turbinowego – długość  $a$  oraz szerokość  $b$  mierzone zwykle na rzucie na płaszczyznę przechodzącą przez oś wału mieszadła oraz przez jej środek powodują, że np. długość łopatki zakrzywionej nie jest mierzona w rozwinięciu, lecz jako długość jej rzutu na promień wychodzący z osi wału i przechodzący przez środek długości łopatki.

Na podstawie badań doświadczalnych różni autorzy wykazali, że zarówno długość, jak i szerokość łopatki mieszadła mają wpływ na moc mieszania. Należy jednak zaznaczyć, że długość jest parametrem niezależnym jedynie w przypadku łopatki niepełnej długości, tj. przy mieszadłach tarczowych. Przy łopatkach pełnej długości, przytwierdzonych bezpośrednio do piasty lub wału, długość łopatki  $a$  jest już ujęta w średnicy mieszadła  $d$ . Dlatego też mało jest badań dotyczących wpływu tego parametru na moc mieszania.

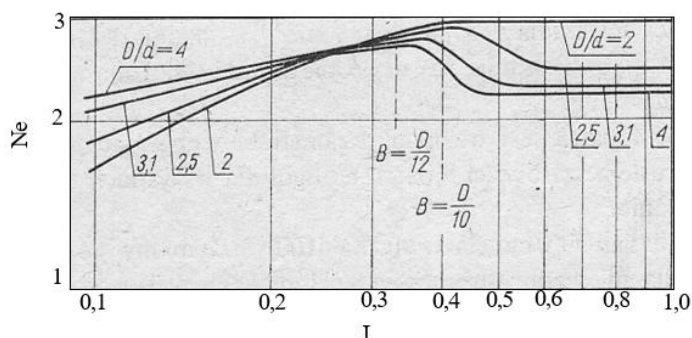
Szerokość łopatek jest natomiast ważnym parametrem silnie wpływającym na moc mieszania. Ze wzrostem szerokości łopatek na ogół dla wszystkich typów mieszadeł rośnie moc mieszania. Na rysunku 5.2 przedstawiono przykładową charakterystykę obrazującą wpływ parametru szerokości łopatek mieszadła na moc mieszania.



Rys. 5.2. Charakterystyki mocy mieszadeł turbinowych różnych typów [88]

Zarówno kształt, jak i ustawienie łopatek wpływają na moc mieszania, przy czym wszelkie zmiany w porównaniu do łopatek prostych ustawionych promieniowo dają na ogół w efekcie obniżkę mocy mieszania w obszarze przepływu burzliwego oraz nie mają wpływu na moc w obszarze przepływu uwarstwionego, co można zaobserwować również na rysunku 5.2. Tak więc zakrzywienie łopatek obniża moc nieznacznie – o około 20%, natomiast pochylenie łopatek względem płaszczyzny obrotu mieszadła daje znaczną obniżkę mocy.

W literaturze opisywane są także badania doświadczalne wskazujące na słaby wpływ parametru  $D/d$  (średnicy zbiornika) na moc mieszania. Na rysunku 5.3 przedstawiono wykres, z którego wynika, że dla zbiornika z przegrodami o wymiarach  $B/D = 0,2$  do  $0,3$  wpływ ten praktycznie zanika.

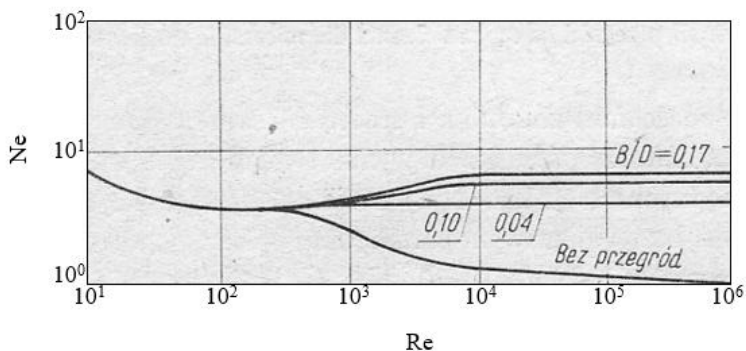


Rys. 5.3. Wpływ średnicy zbiornika i przegród na moc mieszania dla mieszadeł turbinowych [75]

Z tego względu zwykle podaje się wartość parametru  $D/d$  (lub jego zakres) przy danej charakterystyce mocy. Jeżeli nie jest podane, należy przyjąć standardową jego wartość dla danego typu mieszadła.

Kolejnym parametrem wpływającym na moc mieszania jest obecność przegród w zbiorniku mieszalnika. Obecność przegród w zbiorniku podwyższa znacznie moc mieszania w obszarze przepływu burzliwego w porównaniu z mocą dla zbiornika bez przegród. Przegrody podwyższają moc mieszania dla mieszadła z łopatkami prostymi około 5 razy w stosunku do mocy dla zbiornika bez przegród. Przykładowy wpływ szerokości przegród na moc mieszania dla mieszadła turbinowego przedstawiono na rysunku 5.4.





Rys. 5.4. Wpływ szerokości przegród na moc mieszania dla mieszadła turbinowego tarczowego oraz  $Z = 6$ ,  $J = 4$  [75]

Standardowym rozwiązaniem w odniesieniu do szerokości przegród w procesie mieszania jest przyjęcie szerokości przegród  $B = D/10$  oraz liczbę przegród  $J = 4$  [13].

Standardowa wysokość (głębokość) cieczy w zbiorniku (dla mieszalników z mieszadłami turbinowymi) równa jest najczęściej średnicy zbiornika,  $H = D$ . Badania prowadzone w tym zakresie nie wykazały wpływu zmiany tego parametru na moc mieszania.

Pod pojęciem usytuowania mieszadła określa się wpływ takich parametrów, jak wysokość zawieszenia mieszadła  $h/d$ , czyli odległość osi mieszadła od osi zbiornika pionowego lub pochylenie wału mieszadła względem osi zbiornika.

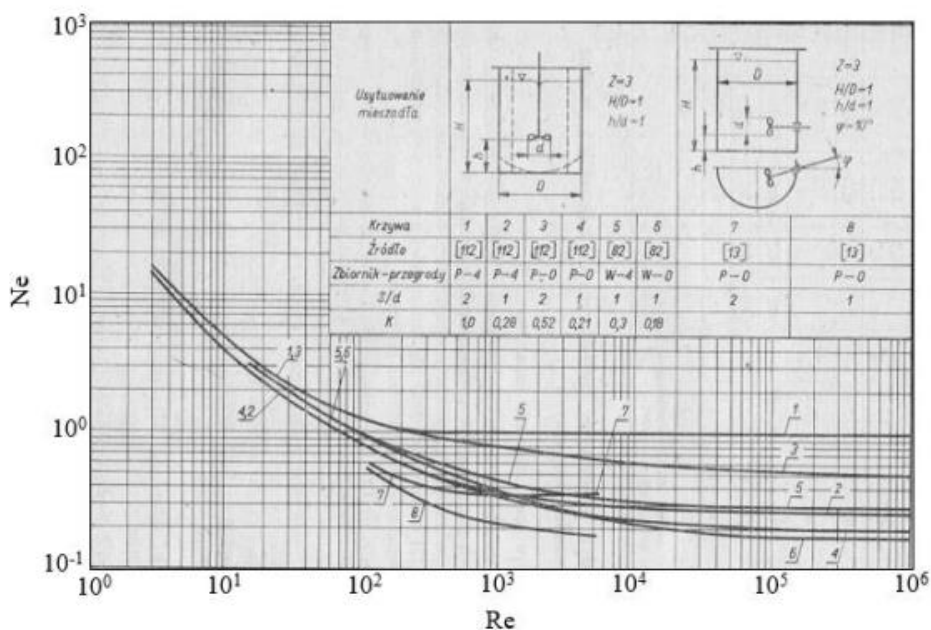
Wysokość zawieszenia jest to odległość mierzona od dolnej krawędzi łopatki mieszadła do dna zbiornika. Jeżeli dno jest wypukłe, niektórzy odległość tę mierzą od dolnej krawędzi łopatki mieszadła do końca części cylindrycznej płaszczyzny, czyli krawędzi, na której część cylindryczna płaszczyzny przechodzi w wypukłość. Spotykane są także przypadki mierzenia tej odległości od środka łopatek mieszadła. Ogólnie jednak w badaniach wykazano znikomy wpływ tego parametru na moc mieszania, jeżeli mieszadło nie jest umieszczone w zbyt skrajnym położeniu, np. zbyt blisko górnego poziomu cieczy, przez co powstaje lej, rozbrzgiwanie cieczy oraz obniżenie mocy.

Pochylenie mieszadła  $e'$ , nazywane również ekscentrycznością, czyli odległość osi mieszadła od osi mieszalnika jest to kąt pomiędzy osią mieszadła a osią zbiornika, wpływają również na moc mieszania. Rozwiązanie takie zastępuje w pewnym stopniu przegrody i bywa stosowane w przypadku cieczy o dużych lepkościach, kiedy obecność przegród powoduje zastoje cieczy w ich okolicy. Moc mieszania dla maksymalnej ekscentryczności w zbiorniku bez przegród jest porównywalna z mocą mieszania dla zbiornika z przegrodami oraz osiowego usytuowania mieszadła.

Kolejnym czynnikiem mogącym mieć wpływ na moc mieszania jest kierunek obrotów mieszadła. W literaturze nie opisano wyników badań stwierdzających zmiany mocy mieszania przy zmianie kierunku obrotów.

## 5.2. Wpływ parametrów geometrycznych mieszalnika na moc mieszadeł śmigłowych i ślimakowych

Mieszadła śmigłowe nie mają tak wielu odmian konstrukcyjnych jak mieszadła turbinowe, w związku z czym ilość publikacji poświęconych tej tematyce jest stosunkowo mniejsza. Na rysunku 5.5 przedstawiono charakterystyki mocy mieszadeł śmigłowych. Przedstawiono charakterystyki dla różnych skoków mieszadeł oraz dla zbiorników zarówno z przegrodami jak i bez.



Rys. 5.5. Charakterystyki mocy mieszadeł śmigłowych: P – zbiornik z płaskim dnem, W – zbiornik z dnem wypukłym [75]

Porównując krzywe na rysunku 5.5 z poprzednimi rysunkami dla mieszadeł turbinowych (rys. 5.2) oczywiste jest, że moc mieszadeł śmigłowych jest znacznie mniejsza od mocy mieszadeł turbinowych, np. moc mieszadła śmigłowego z trzema łopatkami o skoku  $S/d = 2$  jest w zakresie przepływu burzliwego (zbiornik z przegrodami) około siedmiokrotnie mniejsza od mocy mieszadła turbinowego tarczowego otwartego z sześcioma łopatkami prostymi o tej samej średnicy.

Ze względu na znaczną oszczędność energii na mieszanie mieszadła śmigłowe są chętnie stosowane, szczególnie w przypadku dużych urządzeń mieszających.

Wykonanie łopatek mieszadeł śmigłowych o różnych parametrach geometrycznych jest znacznie trudniejsze niż łopatek mieszadeł turbinowych, dlatego też są one rzadziej modyfikowane. W aspekcie wpływu parametrów geometrycznych na moc mieszadeł śmigłowych wzrost liczby łopatek powoduje dość silny wzrost mocy mieszania, co można zauważyć na rysunku 5.5. Jednak najczęściej producenci oprzyrządowania tego rodzaju oferują mieszadła o małej liczbie łopatek (2 lub 3).

Wzrost szerokości łopatek powoduje również wzrost mocy mieszania.

Na temat wpływu średnicy zbiornika – parametr  $D/d$  – przyjmuje się, że wpływ tego parametru jest niewielki.

Pochylenie mieszadła w przypadku mieszadeł śmigłowych zastępuje przegrody i jest stosowane dla niedużych mieszadeł przenośnych. Szczególnym przypadkiem pochylenia jest usytuowanie boczne mieszadła, stosowane dla dużych mieszalników, co pozwala na skrócenie długości wału mieszadła. Moc tak umieszczonego mieszadła w zbiorniku bez przegród wynosi około 50% mocy dla usytuowania pionowego centrycznego w zbiorniku z przegrodami.

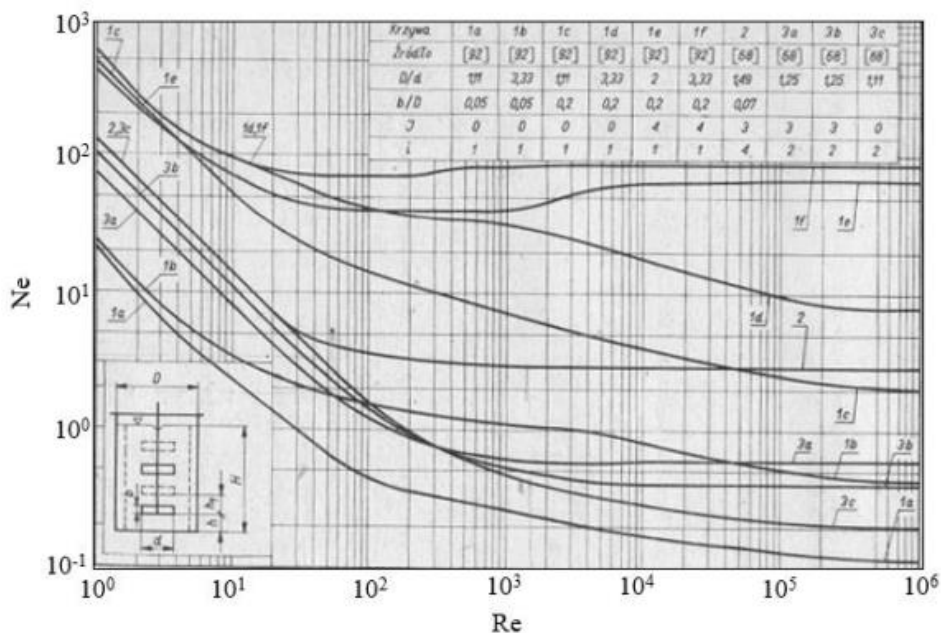
Podobnie przesunięcie osi wału mieszadła względem osi mieszalnika (tzw. usytuowanie ekscentryczne) powoduje wzrost mocy mieszalnika. Usytuowanie takie jest zalecane dla cieczy o podwyższonych lepkościach.

W przypadku obecności przegród w zbiorniku mieszalnika jest podobnie. Umieszczenie przegród na obwodzie zbiornika, utrudniających zawirowania cieczy, zwiększa moc mieszania. Dla  $Re = 10^5$  oraz dla mieszadła o skoku  $S = 2d$  wzrost mocy dla zbiornika z przegrodami w porównaniu ze zbiornikiem bez przegród wynosi około 70%, a więc jest znacznie słabszy niż dla mieszadeł turbinowych.

Mieszadła ślimakowe, podobnie jak mieszadła śmigłowe wywołują osiową cyrkulację cieczy, tak więc charakteryzują się podobnym przebiegiem charakterystyki mocy. Są one jednak częściej stosowane do mieszania cieczy o dużych lepkościach, gdyż ze wzrostem lepkości wskazują wzrost intensywności cyrkulacji cieczy. Mieszadła ślimakowe pracują w takich układach lepiej niż mieszadła śmigłowe, turbinowe i łapowe, które ze wzrostem lepkości cieczy pogarszają intensywność cyrkulacji.

### **5.3. Wpływ parametrów geometrycznych mieszalnika na moc mieszadeł łapowych**

Mieszadło łapowe składa się z dwu lub więcej łap, najczęściej płaskich, przytwierdzonych bezpośrednio do wału lub piasty wału. Ze względu na prostotę konstrukcji ten typ mieszadeł jest najczęściej stosowany. Na rysunku 5.6 przedstawiono charakterystyki mocy mieszadeł łapowych.



Rys. 5.6. Charakterystyki mocy mieszadeł łopowych [75]

Na rysunku 5.6 można zaobserwować, że wpływ szerokości łapy mieszadła oraz parametru stosunku  $D/d$  na moc mieszadła jest dość znaczny.

Przegrody zbiornika mieszalnika zwiększają moc mieszania w obszarze przepływu burzliwego, natomiast nie wykazują wpływu w obszarze przepływu uwarstwionego. Można to zaobserwować na przedstawionych na rysunku 5.6. Wzrost liczby i szerokości przegród powoduje szybki wzrost mocy mieszania do pewnej wartości, osiągając maksimum, dalsze poszerzenie przegród powoduje spadek mocy.

Pochylenie łopatek mieszadła względem płaszczyzny obrotu obniża moc mieszania w porównaniu do usytuowania prostopadłego.

Wysokość zawieszenia mieszadła w zakresie  $h = 0,1D - 0,9D$  nie ma wpływu na moc mieszania. Liczba moc mieszadła natomiast zwiększa moc mieszania. Można ją przyjąć jako przybliżoną zależność  $b \cdot Z = const$ . Zależność ta jest obowiązująca dla uzyskania stałej mocy mieszania w zbiorniku bez przegród, przy założeniu stałości wszystkich pozostałych parametrów procesu.

## 6. Wymiana ciepła w mieszalnikach

Proces mieszania kompozycji klejowych jest procesem krótkotrwałym w porównaniu np. z mieszaniem składników kompozycji polimerowych. Jednak z uwagi na reaktywność składników klejów syntetycznych w procesie mieszania może wydzielać się znaczne ciepło. Z drugiej strony, składniki kleju mogą charakteryzować się znaczną lepkością i gęstością, którą można obniżyć poprzez ogrzanie tych składników. Zabieg taki prowadzony jest w celu uzyskania jednolitej mieszaniny w procesie mieszania. Aby kontrolować temperaturę i wymianę ciepła w procesie mieszania w mieszalniku można stosować płaszcze grzejne lub chłodzące lub też węzownice, które zanurzone są w mieszanej kompozycji [1, 42, 70]. W pewnych przypadkach stosuje się obydwa sposoby wymiany ciepła [38]. Może to być podyktowane koniecznością intensywnego grzania lub chłodzenia mieszanej substancji, bądź też np. płaszcz służy do grzania, a węzownica do chłodzenia, lub na odwrót, jeżeli oba te etapy wymiany ciepła są realizowane kolejno po sobie.

Z punktu widzenia szybkości wnikania ciepła wewnątrz mieszalnika wielkością najbardziej charakterystyczną jest współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  od ścianki mieszalnika do cieczy mieszanej [18]. Pomiar tego współczynnika polega m.in. na mierzeniu globalnego strumienia cieplnego oraz średniej różnicy temperatur pomiędzy temperaturą ścianki a temperaturą cieczy mieszanej.

Często jednak podczas mieszania, np. kompozycji epoksydowych, kompozycji poliestrowych znajomość średniego współczynnika wnikania ciepła na ściance mieszalnika nie jest wystarczająca i wskazana jest znajomość rozkładu lokalnych współczynników wnikania na ściance. Dotyczy to przede wszystkim rozkładu wzdłuż wysokości ścianki [14, 34], rzadziej wzdłuż obwodu ścianki [34] lub w obu kierunkach [33]. W przypadku płaszczonego grzania zawartości mieszalnika, gorsza szybkość wnikania ciepła w określonym miejscu ścianki, czyli niższe wartości współczynników  $\alpha_{lok}$ , powoduje wyższą temperaturę ścianki w tym miejscu. Jeśli mieszamy produkty wrażliwe na temperaturę, może to prowadzić do lokalnej zmiany właściwości tych produktów.

Zakres zmian lokalnych wartości  $\alpha_{lok}$  w stosunku do wartości średniej dla całej powierzchni wymiany ciepła zależy od stosowanego typu mieszadła. Dla mieszadeł o działaniu promieniowym, gdzie z obszaru mieszadła wypływa znaczny strumień cieczy w kierunku poziomym i zostaje wyhamowany dopiero na ściance mieszalnika, rozpiętość może być nawet kilkakrotna i najwyższe wartości występują zawsze na poziomie zawieszenia mieszadła [14, 57, 58, 64]. W przypadku mieszadeł, np. kotwicowych rozkłady wartości wzdłuż wysokości ścianki mieszalnika są zazwyczaj nieznaczne [15, 60] i wynikają z budowy tych mieszadeł. Określanie rozkładu lokalnych wartości współczynników

$\alpha_{lok}$  wzdłuż wysokości mieszalnika ma przede wszystkim duże znaczenie poznawcze, a jedynie w niektórych przypadkach (możliwość np. lokalnego przegrzania mieszaniny reakcyjnej) ma również znaczenie praktyczne. Ze względów utylitarnych, podczas projektowania systemu mieszalnika, większe znaczenie mają średnie wartości tych współczynników, gdyż na ich podstawie oblicza się intensywność wymiany ciepła w całym mieszalniku oraz określa wartość strumienia cieplnego przenikającego przez ścianę mieszalnika do cieczy mieszanej.

Wnikanie ciepła w mieszalnikach jest bardziej złożone niż w przypadku np. wymienników rurowych, a to ze względu na bardziej złożone warunki hydrodynamiczne cieczy, jakie panują w mieszalniku. Współczynniki wnikania ciepła w mieszalniku są różne w zależności od miejsca na powierzchni wymiany ciepła. W odniesieniu do konkretnych przykładów, które autorzy opisywali w swoich publikacjach, w przypadku mieszadeł turbinowych, które dają promieniowy przepływ cieczy, najbardziej intensywna wymiana ciepła zachodzi na wysokość zawieszenia mieszadła [74]. Można więc mówić o współczynnikach wnikania ciepła lokalnych (dla określonego punktu na powierzchni wymiany ciepła w mieszalniku) lub o wartości średniej współczynnika wnikania ciepła, aktualnej dla całej powierzchni.

Przez pojęcie wnikanie ciepła w mieszalniku rozumie się najczęściej ruch ciepła od powierzchni elementu grzejnego umieszczonego wewnątrz mieszalnika do cieczy mieszanej lub odwrotnie. Elementem grzejnym może być płaszcz grzejny, wężownica zanurzona w cieczy mieszanej lub powierzchnia obracającego się mieszadła. Często podczas doświadczalnych badań laboratoryjnych stosuje się nie pojedynczą powierzchnię wymiany ciepła, ale kombinację wymienionych sposobów, zapewniając w ten sposób możliwość przeprowadzenia pomiarów podczas ustalonego ruchu ciepła. Inną przyczyną stosowania kilku powierzchni wymiany ciepła to potrzeba intensywnego grzania cieczy lub chłodzenia zawartości mieszalnika.

Ilość ciepła wymieniana w mieszalniku w jednostce czasu przez ściankę płaszcza lub wężownicy może być obliczona z zależności [41]:

$$Q = kF(t_0 - t)_m \quad (10)$$

gdzie:

$k$  – współczynnik przenikania ciepła,

$F$  – powierzchnia wymiany ciepła,

$(t_0 - t)_m$  – średnia różnica temperatur pomiędzy czynnikiem grzejnym (chłodzącym oraz mieszaną cieczą).

Intensywność tego procesu określa współczynnik przenikania ciepła uwzględniający w swojej wartości wszystkie opory cieplne [41]:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_0} + \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha} \quad (11)$$

gdzie:

$\frac{1}{\alpha_0}, \sum \frac{s_i}{\lambda_i}, \frac{1}{\alpha}$  – przedstawiają średnie dla całej powierzchni F opory cieplne wnikania po stronie czynnika grzejącego (chłodzącego), na ściance oraz po stronie mieszanej cieczy.

W przypadku burzliwego przepływu cieczy w mieszalniku zakłada się idealne wymieszanie substancji, wówczas  $t = \text{const}$ .

Współczynniki wnikania ciepła w mieszalniku są różne dla różnych miejsc na powierzchni wymiany ciepła. Zmianie ulega też zwykle temperatura ścianki grzejnej (chłodzącej) płaszczu lub wężownicy. Jest to związane z określonym rozkładem prędkości cieczy w mieszalniku, jednak na ogół temperatura cieczy mieszanej w mieszalniku zmienia się w niewielkim zakresie, a sama znajomość rozkładu lokalnych współczynników wnikania ciepła w mieszalniku jest interesująca ze względu na możliwość usytuowania powierzchni wymiany w sferach najwyższej intensywności wymiany (np. właściwe zabudowanie płaszczu lub wężownicy), jak również na możliwość poprawnego obliczania średnich wartości współczynników wnikania dla całego mieszalnika i porównania ich z wartościami średnimi uzyskanymi w wyniku pomiarów bezpośrednich.

## 7. Przykłady wpływu rodzaju mieszadła na właściwości kleju

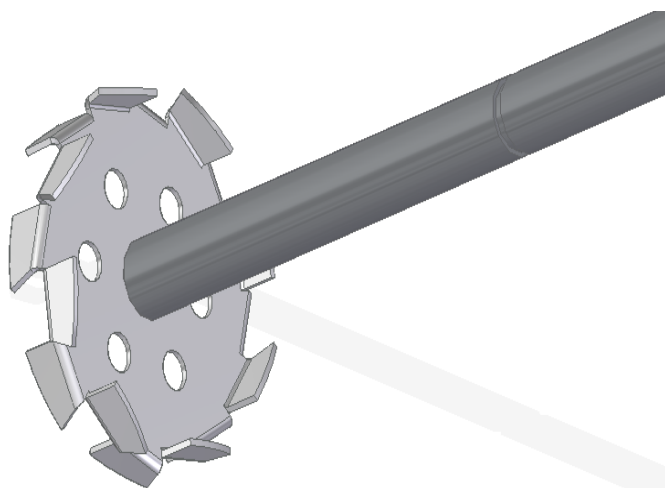
W celu oceny wpływu rodzaju mieszadła na właściwości kleju poniżej przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych prowadzonych w tym zakresie.

Pierwszym przykładem jest porównanie wytrzymałości kleju epoksydowego mieszanego przy użyciu mieszadła łapowego oraz mieszadła tarczowego [53]. Kompozycje klejowe mieszano z prędkością 460 obr/min w czasie 3 min. Przedmiotem badań próbki kompozycji klejowej w stanie utwardzonym żywicy epoksydowej Epidian 57 i utwardzacz Z-1 mieszanych w stosunku stechiometrycznym 100:10. Dodatkowo do kompozycji wprowadzono dodatki modyfikujące w postaci 5% Montmorylonitu ZR2 (5% masy żywicy), 20% węgla wapnia  $\text{CaCO}_3$  (20% masy żywicy) oraz 20% węgla aktywnego CWZ-22 (20% masy żywicy). Przeprowadzono badania wytrzymałości na rozciąganie. Mieszanie kompozycji klejowych realizowano przy użyciu dwóch rodzajów mieszadeł: łapowego i tarczowego dyspergującego, których geometrię przedstawiono na rysunku 7.1 i rysunku 7.2.



Rys. 7.1. Mieszadło łapowe użyte w badaniach [53]



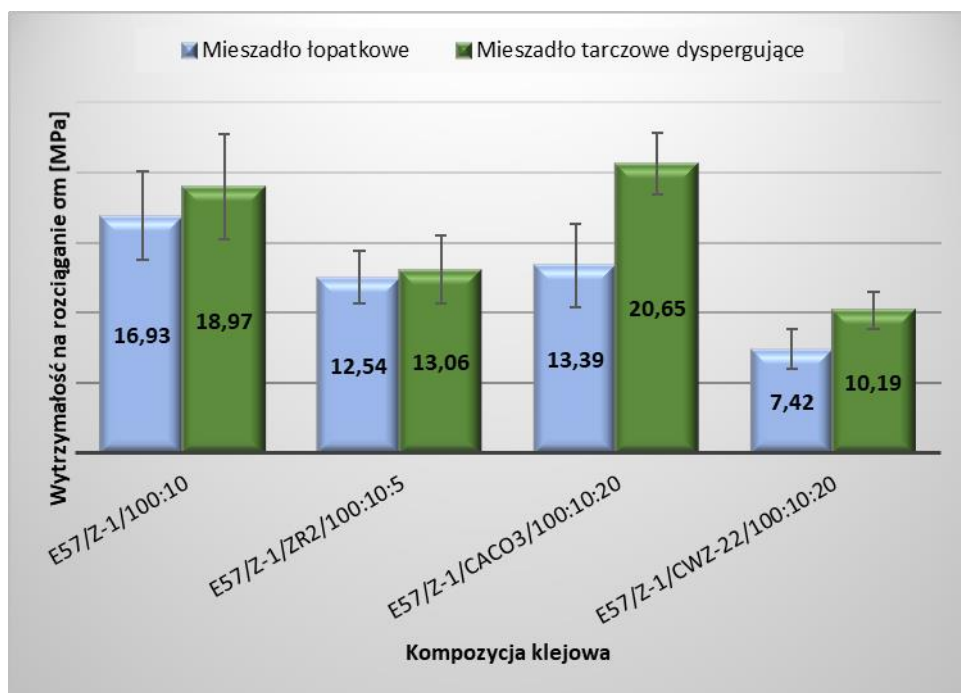


Rys. 7.2. Mieszadło tarczowe dyspergujące użyte w badaniach [53]

Mieszadła mocowane były na wiertarce stołowej kolumnowej OPTI-MUM B20, dzięki której nadawana była prędkość obrotowa mieszadeł.

Próbki epoksydowych kompozycji klejowych przygotowywano w temperaturze  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  przy wilgotności powietrza  $23 \pm 3\%$  po czym poddano procesowi jednostopniowego utwardzania na zimno przez okres 7 dni w niezmiennych warunkach. Kształt próbek wiosełkowych przeznaczonych do badań uzyskany został dzięki zastosowaniu formy do odlewania, której wymiary określone są normą PN EN ISO 527-2 [111]. Badania wytrzymałości na rozciąganie kompozycji klejowych przeprowadzano na maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z150, zgodnie z normą PN EN ISO 527-1 (Tworzywa sztuczne – oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu) [111]. Prędkość przesuwu trawersy podczas badania wynosiła 5 mm/min, zaś prędkość badania modułu rozciągania wynosiła 1 mm/min. Siła wstępna rozciągania wynosiła 30 N.

Uzyskane wyniki badań przedstawiono na rysunku 7.3.

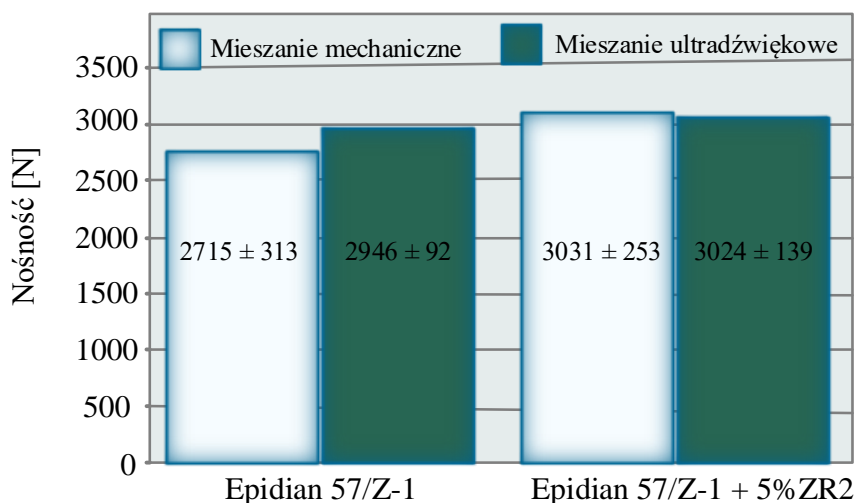


Rys. 7.3. Średnia wytrzymałość na rozciąganie kompozycji klejowych wykonanych przy użyciu różnych narzędzi mieszających [51]

Na podstawie przedstawionych wyników badań można zauważyć, że zastosowanie mieszadła tarczowego dyspergującego pozwoliło uzyskać znacznie wyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie w porównaniu z tradycyjnym mieszadłem łopatkowym. Dodatkowo, zastosowanie tego rodzaju konstrukcji mieszadła pozwala zwiększyć powtarzalność uzyskiwanych wyników. Wpływ dodatków modyfikujących wpływał na pogorszenie właściwości wytrzymałościowych, ale zastosowanie odpowiedniego mieszadła pozwala poprawiać odpowiednie rozbitcie i aglomerację napełniacza w matrycy kompozycji klejowej, jaką jest żywica.

Wpływ sposobu mieszania kleju na wytrzymałość połączeń klejowych opisywany był przez autorów licznych publikacji [27, 50, 65], dlatego kolejnym przykładem oceny wpływu rodzaju mieszadła na właściwości kleju są wyniki porównujące wytrzymałość doraźną połączeń klejowych zaprezentowane na rysunku 7.4 [65]. Połączenia klejowe wykonane zostały za pomocą dwóch metod mieszania kleju: metodą mieszania mechanicznego oraz kąpieli ultradźwiękowej. Klejem użytym w badaniach była kompozycja żywicy epoksydowej Epidian 57 modyfikowanej napełniaczami ceramicznymi usieciowana utwardzaczem Z-1. Autor podał również informację, że podjęta została także próba mieszania napełniacza z żywicą za pomocą homogenizatora ultradźwiękowego Hielscher UP 100H, jednak wykorzystanie tego rodzaju urządzenia

związane jest z wydzielaniem się dużych ilości ciepła podczas mieszania, co w przypadku dodania utwardzacza do masy klejowej skutkuje niemalże natychmiastowym jej utwardzeniem, a nawet następował rozkład żywicy. Stosowanie tej techniki wymagałoby zatem skutecznego odprowadzenia ciepła. Dlatego w badaniach zastosowano kąpiel ultradźwiękową, wykorzystując fakt, iż metoda ta zmniejsza gęstość energii rozpraszanej w procesie mieszania, łagodząc w ten sposób problemy związane z sonikacją tworzywa podczas stosowania homogenizatora ultradźwiękowego [65]. W badaniach eksperymentalnych, których wyniki przedstawiono poniżej wykorzystano połączenia jednozakładkowe o długości zakładki 12,5 mm. Łączono ze sobą elementy wykonane ze stopu aluminium 2024-T3 o długości 75 mm, szerokości 20 mm i grubości 2 mm.

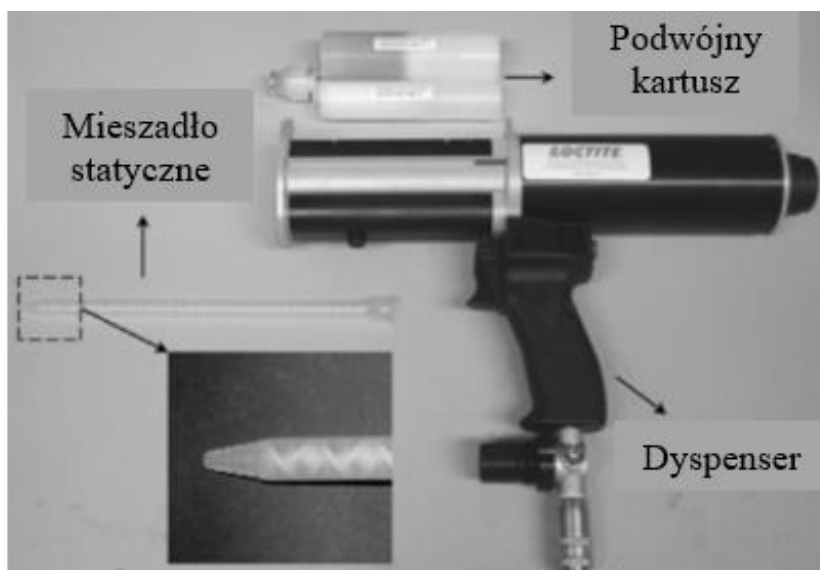


**Rys. 7.4. Porównanie wytrzymałości doraźnej połączeń klejowych ze spoinami niemodyfikowanymi oraz modyfikowanymi dla dwóch sposobów mieszania kleju [65]**

Na podstawie przedstawionych wyników badań, można zauważyć, że w przypadku połączeń klejowych, w których spoina była przygotowana na bazie kompozycji klejowej (Epidian 57/Z-1 + NanoBent ZR2), nie obserwowano zmiany ich wytrzymałości po zastosowaniu kąpeli ultradźwiękowej w stosunku do mieszania mechanicznego. Wytrzymałość doraźna połączeń ze spoiną modyfikowaną nie zależała od metody mieszania (w przeciwieństwie do połączeń, w których nie stosowano w kleju nanonapełniaczy).

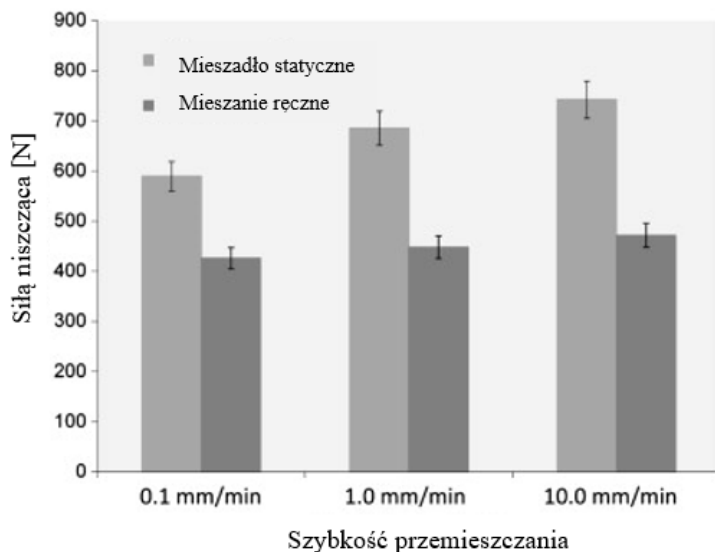
W kolejnym przykładzie obrazującym wpływ technologii mieszania na właściwości użytkowe klejów Katnam i inni [35] opisali wpływ techniki mieszania na wytrzymałość na rozciąganie dwuskładnikowego kleju w postaci pasty epoksydowej. Klejem użytym w badaniach był dwuskładnikowy klej epoksydowy EA 9380.05 firmy Henkel Adhesives. W pracy badano kleje uzyskane przy użyciu dwóch technik mieszania kleju: z użyciem mieszalnika statycznego oraz

mieszania ręcznego. Klej był dostarczany zarówno w postaci podwójnych kartuszy, jak i w puszkach. Klej w kartuszach był aplikowany przy użyciu dozownika połączonego z mieszadłem statycznym. Do mieszadła było pompowane sprężone powietrze w celu uzyskania jednolitej pasty klejowej z dyszy mieszadła. Schemat tego rodzaju mieszania przedstawiono na rysunku 7.5.



Rys. 7.5. Dozownik mieszadła kleju w kartuszach i mieszadło statyczne użyte w badaniach [35]

W przypadku kleju przygotowywanego ręcznie, obie części były ważone i mieszane w naczyniu za pomocą szpatułki, aż do uzyskania jednolitego koloru. Do badań przygotowano arkusze kleju, z których następnie wycinano próbki o odpowiednim kształcie. Próby rozciągania przeprowadzono przy trzech różnych prędkościach przemieszczenia (0,1, 1,0 i 10,0 mm/min), a uzyskane obciążenia niszczące porównano dla próbek z mieszanki dozującej i mieszanki wykonanej ręcznie. Wyniki uzyskanych badań przedstawiono na rysunku 7.6.

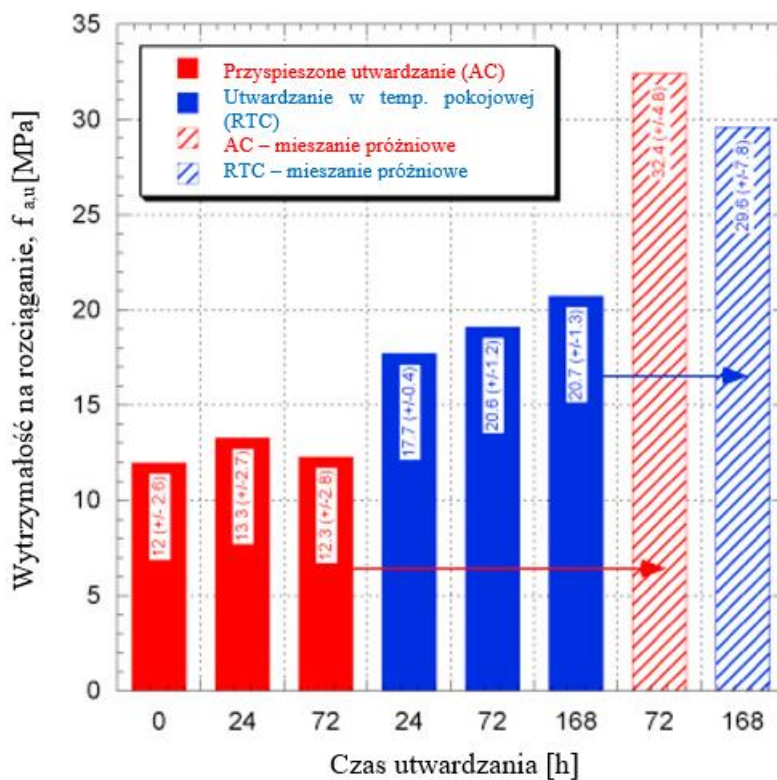


Rys. 7.6. Porównanie obciążeń niszczących dla próbek przygotowanych przy użyciu mieszadła statycznego i mieszanych ręcznie [35]

Próbki z mieszadła statycznego ulegały zniszczeniu przy wyższych obciążeniach ze wzrostem prędkości przemieszczenia, co wskazuje na zależność od prędkości. Natomiast próbki z mieszanki wykonanej ręcznie nie wykazały żadnej zależności od prędkości.

Wyniki badań wskazują, że technika mieszania wpływa znacząco na wytrzymałość na rozciąganie badanego kleju. Próbki zmieszane przy użyciu dozownika uległy zniszczeniu przy znacznie wyższych średnich naprężeniach (>30%) niż próbki zmieszane ręcznie.

W aspekcie mieszania kompozycji klejowych nie tylko geometria mieszalnika ma wpływ, ale również, co warto podkreślić procesy towarzyszące procesowi mieszania. Prowadzone są różne badania, których celem jest poprawa właściwości klejów. Przykład opisujący wpływ sposobu mieszania na właściwości uzyskiwanych kompozycji został przedstawiony przez Michelsa i innych w publikacji [50]. Autorzy przedstawili charakterystykę wytrzymałości, sztywności i porowatości klejów epoksydowych stosowanych w inżynierii strukturalnej, które przygotowano na dwa sposoby: w warunkach otoczenia i mieszania w próżni. Geometria mieszadła w obu przypadkach była jednakowa. Dodatkowym wariantem zmiennym w przeprowadzonych badaniach był czas utwardzania kleju. Uzyskane wyniki badań wytrzymałości przedstawiono na rysunku 7.7.



Rys. 7.7. Średnie wartości wytrzymałości w zależności od rodzaju i czasu utwardzania oraz sposobu mieszania [50]

Dodatkowo w opisanych badaniach wykonano analizę mikroskopową powierzchni zniszczenia, dzięki czemu możliwa była ocena struktury i porowatości badanych próbek. Wyniki tych badań przedstawiono w tabeli 7.1.

**Tabela 7.1. Wyniki oceny porowatości i efektywnej wytrzymałości na rozciąganie [50]**

	$A_{tot}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{pores,tr}$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_{pores}$ [mm <sup>2</sup> ]	$\rho$ [%]	$F_{a,u,sp}$ [N]	$f_{a,u,sp}$ [MPa]	$f_{a,u,eff}$ [MPa]
1	40.89	8.04	5.76	14.10	514	12.6	14.6
2	48.90	8.29	5.66	11.57	698	14.3	16.1
3	46.53	10.55	7.99	17.16	648	13.9	16.8
3 V	42.29	0.25	0.15	0.36	1308	30.9	31.0
4	44.39	1.68	1.09	2.46	779	17.5	18.0
5	42.27	1.98	1.16	2.73	903	21.4	22.0
6	51.31	2.97	1.75	3.40	1153	22.5	23.3
6 V	45.86	0.30	0.23	0.50	1556	33.9	34.1
7	48.88	2.55	1.56	3.19	1392	28.5	29.4
8	46.79	11.41	7.11	15.19	1195	25.5	30.1
9	48.60	7.21	4.43	9.12	1083	22.3	24.5
10	47.05	7.13	4.54	9.65	1056	22.5	24.9

$A_{tot}$  = całkowita powierzchnia przekroju w miejscu uszkodzenia,

$A_{pores,tr}$  = całkowita powierzchnia porów w miejscu uszkodzenia po pierwszym progu jasności,

$A_{pores}$  = całkowita powierzchnia porów w miejscu uszkodzenia,

$\rho$  = współczynnik porowatości w przekroju poprzecznym,

$F_{a,u,sp}$  = wytrzymałość na rozciąganie próbki najbliższej wartości średniej z serii,

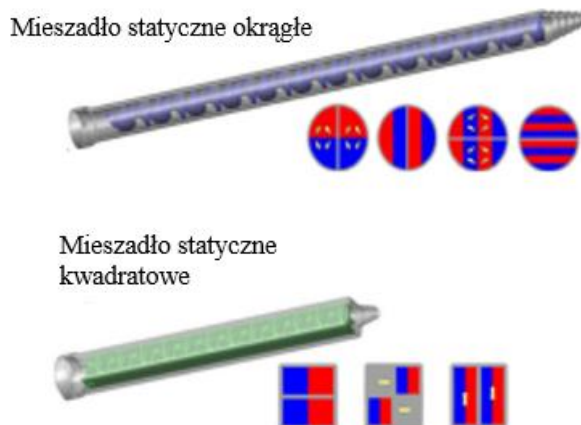
$f_{a,u,sp}$  = nominalna jednokierunkowa wytrzymałość na rozciąganie jednej próbki,

$f_{a,u,eff}$  = efektywna wytrzymałość na rozciąganie epoksydu

Uzyskane wyniki badań wykazały, że ręczne mieszanie epoksydów, a następnie utwardzanie w temperaturze pokojowej powoduje uzyskanie wartości porowatości pomiędzy 2,5 a 3,5%, mierzonej w przekroju zniszczenia. Wstępne zmieszanie składników żywicy w warunkach próżni znacząco zmniejsza współczynnik porowatości w przekroju uszkodzenia do około 0,5% dla obu procedur utwardzania w temperaturze pokojowej i w temperaturze podwyższonej. Nominalna wytrzymałość wzrasta w przypadku obu klejów, które były poddane badaniom. Można zauważyć wyraźną różnicę pomiędzy zastosowanymi sposobami mieszania. Mieszanie kompozycji w próżni pozwoliło poprawić właściwości wytrzymałościowe badanych klejów.

Wyniki badań w zakresie mieszania składników kleju dwuskładnikowego przedstawili w swojej publikacji G. Meschut i in. [49]. Autorzy opisali wyniki

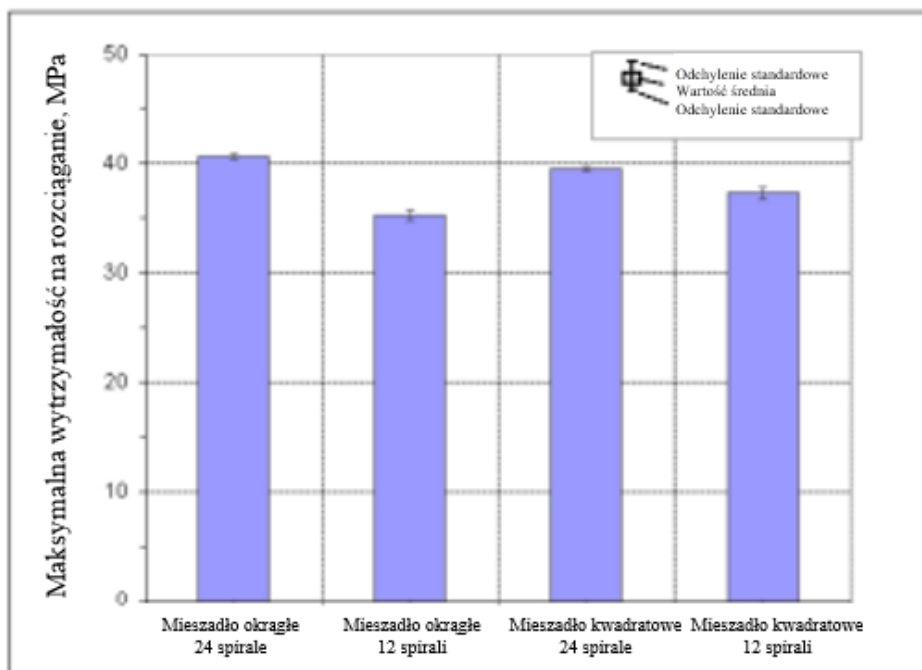
badania, których przedmiotem był klej Sika Force 7584, który dozowany i jednocześnie mieszany był przy użyciu mieszadeł statycznych, które były częścią automatycznego urządzenia do dozowania kleju wyposażonego w pompę tłokową. Składniki kleju dozowane są zatem przy użyciu ciśnienia dostosowanego do lepkości składników kleju. Do badania wpływu geometrii mieszadła i liczby elementów mieszających na właściwości kleju zastosowano mieszadło statyczne spiralny, który składał się z 12 lub 24 spiral skreconych o  $180^\circ$  i połączonych, odpowiednio obróconych o  $90^\circ$ . Drugie mieszadło miało profil kwadratowy i składało się z 12 lub 24 kwadratowych elementów mieszających. Geometrię użytych mieszadeł przedstawiono na rysunku 7.8.



Rys. 7.8. Mieszadła użyte w badaniach [49]

W porównaniu z mieszadłem spiralnym, straty objętościowe mieszadła kwadratowego są znacznie mniejsze ze względu na jego kompaktową budowę. Straty objętościowe definiowane są jako objętość kleju, która pozostaje w systemie mieszania i jest usuwana po wymianie mieszadła. Przy użyciu tych mieszadeł przygotowano wiósełkowe próbki przeznaczone do badania wytrzymałości na rozciąganie. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 7.9.





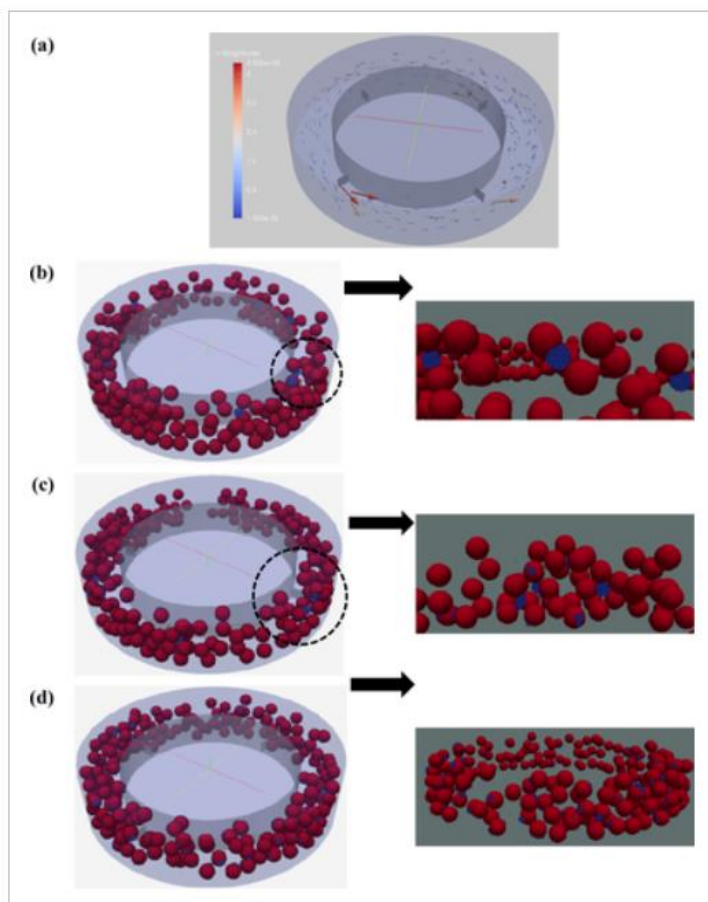
Rys. 7.9. Wpływ geometrii mieszadła i liczby elementów mieszających na średnią wytrzymałość na rozciąganie kleju Sika Force 7584 [49]

Analizując przedstawione wyniki badań można zauważyć, że próbki wykonane przy użyciu mieszadła statycznego okrągłego wykazują wyższą wytrzymałość w porównaniu z próbkami wykonanymi przy użyciu mieszadła kwadratowego. Zmniejszenie liczby elementów mieszających z 24 do 12 powoduje obserwowany spadek maksymalnej wytrzymałości na rozciąganie. Autorzy wskazali także, że minimalizacja liczby elementów mieszających w mieszadle powoduje zmniejszenie wytrzymałości oraz stopnia zmieszania składników kleju.

Podobne badania, ale w innym ujęciu przedstawili również w swojej pracy Xu H. i in. [83], gdzie przedstawili efekt mieszania bezrozpuszczalnikowej kompozycji klejowej, który ma ogromny wpływ na wydajność bezrozpuszczalnikowych produktów laminujących. W artykule wykorzystano teorię przepływu dwufazowego ciecz-ciecz do przeprowadzenia modelowania matematycznego i analizy modelowania teorii dyfuzji między mieszaniem dwufazowym. Badania te przeprowadzono przy użyciu oprogramowania Fluent do przeprowadzenia modelu 3d procesu mieszania materiałów bezrozpuszczalnikowych A i B w czterech różnych mieszalnikach statycznych. Poprzez obliczenia symulacyjne pola przepływu bezrozpuszczalnikowego materiału A i B w mieszalniku, przeanalizowano wpływ wewnętrznej struktury mieszalnika na efekt mieszania na

wyjściu mieszalnika. Poprzez analizę i porównanie czterech mieszalników z różnymi jednostkami mieszającymi wykazano, że efekt mieszania mieszalnika statycznego typu TCCA jest najkorzystniejszy.

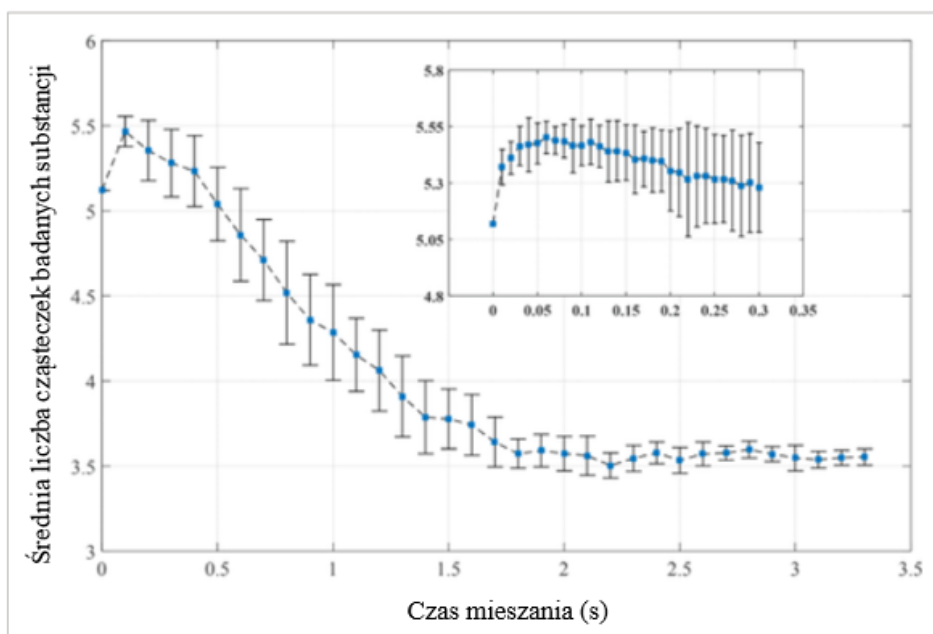
Interesującym kontrastem dla przedstawionych wyników badań, będącym rozwiązaniem problemu mieszania kompozycji klejowych jest podejście M. R. Tamadondara i in., którzy w swojej pracy [77] przedstawili numeryczne modelowanie mieszania cząsteczek składników kleju. W pracy przedstawiono i przeanalizowano symulację procesu mieszania realizowanego w komorze Couette'a, która charakteryzuje się prostą strukturą przepływu, determinowaną głównie przez cząstki nośne, z prawie stałą prędkością ścinania i nie zanikającą składową prędkości. Wielkość prędkości cząstek zmienia się od prawie zera dla cząstek znajdujących się blisko ściany zewnętrznej do maksymalnej wartości bliskiej 4 cm/s dla cząstek mających kontakt z obracającymi się łopatkami (rysunek 7.10a). Autorzy prac [36, 77] wskazują, że w mieszaniu cząstek adhezyjnych można wyróżnić trzy główne etapy, które przedstawiono na rysunku 7.10. W najwcześniejszym etapie mieszania duże i porowate drobne aglomeraty przylegają do sąsiednich nośników (rysunek 7.10b). Czas trwania i siła adhezji pomiędzy aglomeratami i nośnikami silnie zależy od ich energii interfejsu. W miarę dalszego mieszania aglomeraty podlegają siłom ścinającym i kolizyjnym. W tym stanie, nośniki z aglomeratami przyklejonymi do ich powierzchni zderzają się z nośnikami i przenoszą na nie część aglomeratów (rysunek 7.10c). Następnie, w wyniku ciągłych kolizji i tarcia między cząsteczkami, drobiny stopniowo przylegają do powierzchni nośników, a powierzchnia pokryta zwiększa się. Dalsze mieszanie powoduje redystrybucję drobnych cząstek i ich wymianę między nośnikami. Na tym etapie mieszania początkowe aglomeraty już nie istnieją, zamiast nich w układzie można znaleźć dziesiątki sub-aglomeratów, które są stosunkowo dużo mniejsze od początkowych (rysunek 7.10d).



Rys. 7.10. Profil prędkości cząstek. (b)-(d) Ujęcia etapów mieszania i powiększony widok cząstek odpowiednio po 0,05, 0,5 i 3,0 s symulacji [77]

W opisanych badaniach autorzy zastosowali metodę elementów dyskretnych. Przedmiotem tych symulacji były cząsteczki materiałów adhezyjnych w układzie zawierającym duże cząstki nośne i aglomeraty drobnocząsteczkowe. Symulacja rozpoczęła się od 200 nośników i 10 aglomeratów po 1000 drobnych cząstek. Autorzy zauważyli, że w trakcie mieszania aglomeraty są rozbijane, frakcje przylegają do nośników i następuje ciągła redystrybucja drobnych cząstek pomiędzy nośnikami. Wyniki wskazują, że większa część drobnych cząstek jest równomiernie rozproszona na powierzchni nośników, a reszta ma postać swobodnych odłamków. Do prognozowania stopnia wymieszania wprowadzono wskaźnik zależny od czasu.

Podczas prowadzenia badań obliczono średnią liczbę drobnych cząstek w każdym aglomeracie i wykreślono ją w czasie. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rysunku 7.11.



Rys. 7.11. Ewolucja średniej liczby cząstek podczas mieszania w funkcji czasu [77]

Ponieważ wszystkie aglomeraty mają ten sam wzór rozpadu, zamiast przedstawiać 10 odrębnych wykresów, przedstawiono jeden wykres średniej liczby koordynacyjnej dla wszystkich cząstek substancji pełniących rolę nośników, a zmienność pokazano przez dodanie do wykresu odchylenia standardowego. Na rysunku widać, że średnia liczba koordynacyjna aglomeratów wzrasta początkowo przez stosunkowo krótki czas, a następnie maleje aż do wyrównania. Dalsze mieszanie powoduje rozpad aglomeratów i spadek ich średniej liczby koordynacyjnej. W wyniku rozpadu aglomeratów powstają liczne fragmenty, które mają głównie postać jednowarstwowych struktur przyklejonych do powierzchni nośników.

Zaprezentowane i opisane wyniki badań doświadczalnych wskazują, że odpowiedni dobór metody oraz oprzyrządowania do procesu mieszania kleju istotnie wpływa na jego późniejsze właściwości.

## 8. Zakończenie

Proces technologii klejenia jak i wytwarzania klejów zawiera szereg operacji zmierzających do uzyskania połączenia klejowego o określonej charakterystyce. Jednym z ważniejszych etapów jest właściwe przygotowanie kompozycji klejowej, a dokładniej jej właściwe zmieszanie. Mieszanie należy do podstawowych operacji podczas sporządzania kompozycji klejowych, zarówno w zastosowaniach jednostkowych jak i w szerszym pojęciu. Celem mieszania jest wytworzenie mieszaniny o wymaganej jednorodności oraz utrzymanie jej w takim stanie. Odpowiednie zmieszanie składników kleju odgrywa zatem decydującą rolę w dalszym procesie klejenia. Prawidłowy proces przygotowania kompozycji klejowej wpływa istotnie na stopień dyspersji składników kompozycji w matrycy, jak również na stopień napowietrzenia powstałej kompozycji, co w następstwie bezpośrednio wpływa na właściwości wytrzymałościowe i użytkowe użytkowanych kompozycji klejowych.

Na efektywność mieszania wpływa jednak szereg czynników. Podstawowym czynnikiem mającym wpływ na wspomnianą efektywność mieszania jest typ mieszadła lub mieszalnika. Element ten musi bowiem zostać dobrany stosownie do typu procesu, reologii i właściwości składowych produktu końcowego. Kolejnym kluczowym czynnikiem jest dobór odpowiedniej prędkości mieszadła, a co za tym idzie napędu mieszadła, który pozwala odpowiednio zmieszać składniki kleju oraz zmniejszyć zużycie energii.

Stosowanie kompozycji klejowych w wielu konstrukcjach, w wielu gałęziach przemysłu, a także właściwości samych klejów stanowią inspirację do prowadzenia badań doświadczalnych, których celem byłoby dokładniejsze poznanie wpływu technologii mieszania na wytrzymałość klejów oraz na właściwości użytkowe kompozycji klejowych. Z uwagi na ciągły rozwój technologii w zakresie konstrukcji mieszadeł i mieszalników przedstawione opracowanie nie wyczerpuje całkowicie zagadnienia dotyczącego mieszania wieloskładnikowych kompozycji klejowych, dlatego też wraz z rozwojem nowych technologii wersja wydania będzie rozwijana i aktualizowana.

## Literatura

- [1] Anxionnaz Z., Cabassud M., Gourdon C., Tochon P., *Heat exchanger/reactors (HEX reactors): Concepts, technologies: State-of-the-art.*, "Chemical Engineering and Processing: Process Intensification", 2008, 47, 2029–2050.
- [2] Ashby M.F. ed., *Metal foams: a design guide*. Boston, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [3] Axentowicz M., Karpiński J., *Kleje jedno- i dwuskładnikowe produkcji Ciba-Geigy oferowane jako Araldit 2000 oraz Araldit 4000*, "Technologia i Automatyzacja Montażu", 1994, 2, 43–46.
- [4] Berta M., Lindsay C., Pans G., Camino G., *Effect of chemical structure on combustion and thermal behaviour of polyurethane elastomer layered silicate nanocomposites*, "Polymer Degradation and Stability", 2006, 91, 1179–1191.
- [5] Brockmann W. ed., *Adhesive bonding: materials, applications and technology*. Wiley-VCH, 2009.
- [6] Cagle Ch.V., *Kleje i klejenie*, Warszawa. WNT, 1977.
- [7] Chhabra R.P., Richardson J.F., *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*. Amsterdam, Butterworth-Heinemann Elsevier, 2008.
- [8] Chikhi N., Fellahi S., Bakar M., *Modification of epoxy resin using reactive liquid (ATBN) rubber*, "European Polymer Journal", 2002, 38, 251–264.
- [9] Coghén M., Grund J., Potoczny Z., Śmiejek Z., Światowiec M., Sałkiewicz B., *Mieszalnik. PL177711B1*. 1995.
- [10] Cognard P. ed., *Handbook of adhesives and sealants*. Boston, Elsevier, 2006.
- [11] Cudak M., *Analiza wpływu wybranych parametrów na udział gazu zatrzymanego w cieczy dla układu ciecz-gaz-biofaza*, "Inżynieria i Aparatura Chemiczna", 2014, 1, 13,14.
- [12] Czaplicki J., *Klejenie tworzyw konstrukcyjnych*. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1987.
- [13] Dai Y.-X., Wang Z.-H., Fan Y.-W., Cheng Z.-Q., *Analysis of mixing effect and power consumption of cone-bottom dual Rushton turbines stirred tank*, "Chemical Papers", 2022, 76, 2177–2191.
- [14] Delaplace G., Leuliet J.C., Relandeau V., *Circulation and mixing times for helical ribbon impellers. Review and Experiments*, "Experiments in Fluids", 2000, 170–182,

- [15] Delaplace G., Torrez C., Leuliet J.-C., Belaubre N., Andre C., *Experimental and CFD Simulation of Heat Transfer to Highly Viscous Fluids in an Agitated Vessel Equipped With a non Standard Helical Ribbon Impeller*, "Chemical Engineering Research and Design", 2001, 79, 927–937.
- [16] Dillard D.A. ed., *Advances in structural adhesive bonding*. CRC Press [u.a.], 2010.
- [17] Dłuska E., Hubacz R., Wroński S., Kamiński J., Dyla M., Wójtowicz R., *The Influence of Helical Flow on Water Fuel Emulsion Preparation*, "Chemical Engineering Communications", 2007, 194, 1271–1286.
- [18] Dreher S., Kockmann N., Woias P., *Characterization of Laminar Transient Flow Regimes and Mixing in T-shaped Micromixers*, "Heat Transfer Engineering", 2010, 30, 91–100.
- [19] Ebnesajjad S., *Adhesives technology handbook*. Amsterdam, William Andrew Pub, 2008.
- [20] Erbil H.Y., *The debate on the dependence of apparent contact angles on drop contact area or three-phase contact line: A review*, "Surface Science Reports", 2014, 69, 325–365.
- [21] Ghosh J.K., Tokdar S.T., *Convergence and Consistency of Newton's Algorithm for Estimating Mixing Distribution*. *Frontiers in Statistics*. Published by Imperial College Press and Distributed by World Scientific Publishing CO., 2006, 429–443.
- [22] Go K., Kim Y., Lee A.H., Staricha K., Messersmith P., Glucksberg M., *Design of Novel Mixer and Applicator for Two-Component Surgical Adhesives*, "Journal of Medical Devices", 2015, 9, 045001.
- [23] Godzimirski J., *Konstrukcyjne połączenia klejowe elementów metalowych w budowie maszyn*. Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1997.
- [24] Gooch K.J., Kwon J.H., Blunk T., Langer R., Freed L.E., Vunjak-Novakovic G., *Effects of mixing intensity on tissue-engineered cartilage*, "Biotechnology and Bioengineering", 2001, 72, 402–407.
- [25] Gültekin K., Akpınar S., Gürses A., Eroglu Z., Cam S., Akbulut H., Keskın Z., Ozel A., *The effects of graphene nanostructure reinforcement on the adhesive method and the graphene reinforcement ratio on the failure load in adhesively bonded joints*, "Composites Part B: Engineering", 2016, 98, 362–369.
- [26] Habenicht G., *Applied adhesive bonding: a practical guide for flawless results*. Weinheim, Wiley-VCH, 2009.
- [27] Halder S., Ghosh P.K., Goyat M.S., Ray S., *Ultrasonic dual mode mixing and its effect on tensile properties of SiO<sub>2</sub>-epoxy nanocomposite*, "Journal of Adhesion Science and Technology", 2013, 27, 111–124.

- 
- [28] Han D., Ferron R.D., *Influence of high mixing intensity on rheology, hydration, and microstructure of fresh state cement paste*, "Cement and Concrete Research", 2016, 84, 95–106.
- [29] Jurak M., Szafran K., Cea P., Martín S., *Analysis of Molecular Interactions between Components in Phospholipid-Immunosuppressant-Antioxidant Mixed Langmuir Films*, "Langmuir", 2021, 37, 5601–5616.
- [30] Jurkowski B., Jurkowska B., *Sporządzanie kompozycji polimerowych: elementy teorii i praktyki*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1995.
- [31] Kabziński M., Ptaszek P., Ptaszek A., Grzesik M., *The impact of stirrer type on mixing power consumption and apparent viscosity changes of locust bean gum solutions*, "Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego", 2015, 44–47.
- [32] Kamiński J., *Mieszanie układów wielofazowych*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2004.
- [33] Kaminoyama M., Nishi K., Misumi R., Otani F., *A Method for Determining the Representative Apparent Viscosity of Highly Viscous Pseudoplastic Liquids in a Stirred Vessel by Numerical Simulation*, "Journal of Chemical Engineering of Japan", 2011, 44, 868–875.
- [34] Kaminoyama M., Saito F., Kamiwano M., *Flow analogy of pseudoplastic liquid in geometrically similar stirred vessels based on numerical analysis*, "Journal of Chemical Engineering of Japan", 1990, 23, 214–221.
- [35] Katnam K.B., Stevenson J.P.J., Stanley W.F., Buggy M., Young T.M., *Tensile strength of two-part epoxy paste adhesives: Influence of mixing technique and micro-void formation*, "International Journal of Adhesion and Adhesives", 2011, 31, 666–673.
- [36] Kimbonguila Manounou A., Rémond S., *Discrete element modeling of the microstructure of fine particle agglomerates in sheared dilute suspension*, "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications", 2014, 412, 66–83.
- [37] Koch R., Noworyta A., *Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1998.
- [38] Konopacki M., Kordas M., Fijałkowski K., Rakoczy R., *Computational Fluid Dynamics and Experimental Studies of a New Mixing Element in a Static Mixer as a Heat Exchanger*, "Chemical and Process Engineering", 2015, 36, 59–72.
- [39] Kresta S.M., *Advances in Industrial Mixing: A Companion To The Handbook Of Industrial Mixing*. Wiley, 2016.
- [40] Kuczmazewski J., *Technologia śmigłowców: teoria i technika klejenia*. Lublin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 1990.
- [41] Kuncewicz C., *Mieszanie cieczy wysokolepkich: podstawy procesowe*. Łódź, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2012.



- [42] Lisboa P.F., Fernandes J., Simões P.C., Mota J.P.B., Saatdjian E., *Computational-fluid-dynamics study of a Kenics static mixer as a heat exchanger for supercritical carbon dioxide*, "The Journal of Supercritical Fluids", 2010, 55, 107–115.
- [43] Lo M.Y.A., Gierczycki A.T., Titchener-Hooker N.J., Shamlou P.A., *Newtonian power curve and drop size distributions for vibromixers*, "The Canadian Journal of Chemical Engineering", 1998, 76, 471–478.
- [44] Lopes P.E., Moura D., Hilliou L., Krause B., Pötschke P., Figueiredo H., Alves R., Lepleux E., Pacheco L., Paiva M.C., *Mixed Carbon Nanomaterial/Epoxy Resin for Electrically Conductive Adhesives*, "Journal of Composites Science", 2020, 4, 105.
- [45] Marsac P.J., Shamblin S.L., Taylor L.S., *Theoretical and Practical Approaches for Prediction of Drug–Polymer Miscibility and Solubility*, "Pharmaceutical Research", 2006, 23, 2417–2426.
- [46] Martin M., Renault M., Jezequel P.-H., Garcia E., *Mixability and particle size distribution criteria — Study on model materials*, "Powder Technology", 2009, 190, 36–40.
- [47] Mazanec O., Lowke D., Schießl P., *Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time*, "Materials and Structures", 2010, 43, 357–365.
- [48] McClements D.J., *Edible nanoemulsions: fabrication, properties, and functional performance*, "Soft Matter", 2011, 7, 2297–2316.
- [49] Meschut G., Hahn O., Teutenberg D., Ernstberger L., *Influence of the dosing and mixing technology on the property profile of two-component adhesives*, "Welding in the World", 2015, 59, 91–96.
- [50] Michels J., Sena Cruz J., Christen R., Czaderski C., Motavalli M., *Mechanical performance of cold-curing epoxy adhesives after different mixing and curing procedures*, "Composites Part B: Engineering", 2016, 98, 434–443.
- [51] Miturska I., Rudawska A., Müller M., Hromasová M., *The Influence of Mixing Methods of Epoxy Composition Ingredients on Selected Mechanical Properties of Modified Epoxy Construction Materials*, "Materials", 2021, 14, 411.
- [52] Miturska I., Rudawska A., Müller M., Valášek P., *The Influence of Modification with Natural Fillers on the Mechanical Properties of Epoxy Adhesive Compositions after Storage Time*, "Materials", 2020, 13, 291.
- [53] Miturska-Barańska I., Rudawska A., *Możliwość podwyższenia wytrzymałości połączeń klejowych blach ze stopu aluminium w aspekcie modyfikacji klejów epoksydowych: badania eksperymentalne*. Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2021.
- [54] Miturska-Barańska I., Rudawska A., *Urządzenie do mieszania, zwłaszcza kompozycji klejowej*. P.439309, 2021.

- [55] Moszner N., Salz U., Zimmermann J., *Chemical aspects of self-etching enamel–dentin adhesives: A systematic review*, "Dental Materials", 2005, 21, 895–910.
- [56] Muzzio F.J., Alexander A., Goodridge C., Shen E., Shinbrot T., Manjunath K., Dhodapkar S., Jacob K., *Solids Mixing. Handbook of Industrial Mixing*. E.L. Paul, V.A. Atiemo-Obeng, S.M. Kresta, eds. John Wiley & Sons, Inc., 2003, 887–985.
- [57] Nakamura H., Igarashi T., Tsutsui T., *Local heat transfer around a wall-mounted cube at 45° to flow in a turbulent boundary layer*, "International Journal of Heat and Fluid Flow", 2003, 24, 807–815.
- [58] Nakamura H., Igarashi T., Tsutsui T., *Local heat transfer around a wall-mounted cube in the turbulent boundary layer*, "International Journal of Heat and Mass Transfer", 2001, 44, 3385–3395.
- [59] Newton M.A., *On a Nonparametric Recursive Estimator of the Mixing Distribution*, "The Indian Journal of Statistics, Series A", 2002, 64, 306–322.
- [60] Niedzielska A., Kuncewicz Cz., *Heat transfer and power consumption for ribbon impellers. Mixing efficiency*, "Chemical Engineering Science", 2005, 60, 2439–2448.
- [61] Pajula K., Taskinen M., Lehto V.-P., Ketolainen J., Korhonen O., *Predicting the Formation and Stability of Amorphous Small Molecule Binary Mixtures from Computationally Determined Flory–Huggins Interaction Parameter and Phase Diagram*, "Molecular Pharmaceutics", 2010, 7, 795–804.
- [62] Paul E.L., Atiemo-Obeng V.A., Kresta S.M. eds., *Handbook of Industrial Mixing*. John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [63] Peryt-Stawiarska S., Zakrzewska B., Jaworski Z., *The CFD modelling of transient non-Newtonian fluid flow in a Rushton turbine stirred tank*, "Przemysł Chemiczny", 9, 2011.
- [64] Rohlf W., Haustein H.D., Garbrecht O., Kneer R., *Insights into the local heat transfer of a submerged impinging jet: Influence of local flow acceleration and vortex-wall interaction*, "International Journal of Heat and Mass Transfer", 2012, 55, 7728–7736.
- [65] Rośkiewicz M., Rożek M., Zasada D., *Wpływ sposobu mieszania kleju na wytrzymałość doraźną połączeń klejowych*, "Technologia i Automatyzyacja Montażu", 2014, 67–70.
- [66] Rudawska A., *Adhesive mixing and applying device*, "Technologia i Automatyzyacja Montażu", 2019, 3, 42–45.
- [67] Rudawska A., Politechnika Lubelska, *Oprzrzędowanie w technologii klejenia*. Lublin, Politechnika Lubelska, 2016.
- [68] Shonaike G.O., Simon G.P. eds., *Polymer blends and alloys*. Boca Raton, CRC Press, 2019.

- [69] Shyy W., Lian Y., Tang J., Viieru D., Liu H., *Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers*. Cambridge University Press, 2007.
- [70] Simões P.C., Afonso B., Fernandes J., Mota J.P.B., *Static mixers as heat exchangers in supercritical fluid extraction processes*, "The Journal of Supercritical Fluids", 2008, 43, 477–483.
- [71] Smits A.J., McKeon B.J., Marusic I., *High-Reynolds Number Wall Turbulence*, "Annual Review of Fluid Mechanics", 2011, 43, 353–375.
- [72] Stelling G.S., Duinmeijer S.P.A., *A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows*, "International Journal for Numerical Methods in Fluids", 2003, 43, 1329–1354.
- [73] Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Shuiskii A.I., Prokopov A.Yu., Madatyán S.M., Parinov I.A., Cherpakov A.V., *Effects of the Geometric Parameters of Mixer on the Mixing Process of Foam Concrete Mixture and Its Energy Efficiency*, "Applied Sciences", 2020, 10, 8055.
- [74] Stephens G.G., Mackley M.R., *Heat transfer performance for batch oscillatory flow mixing*, "Experimental Thermal and Fluid Science", 2002, 25, 583–594.
- [75] Stręk F., *Mieszanie i mieszalniki*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1991.
- [76] Tadros T., Izquierdo P., Esquena J., Solans C., *Formation and stability of nano-emulsions*, "Advances in Colloid and Interface Science", 2004, 108–109, 303–318.
- [77] Tamadondar M.R., Rasmuson A., Thalberg K., Niklasson Björn I., *Numerical modeling of adhesive particle mixing*, "AIChE Journal", 2017, 63, 2599–2609.
- [78] Tashakkori A., Teddlie C. eds., *Sage handbook of mixed methods in social & behavioral research*. SAGE Publications, 2010.
- [79] Uchida M., Yoshida N., *Information Criteria in Model Selection for Mixing Processes*, "Statistical Inference for Stochastic Processes", 2001, 4, 73–98.
- [80] Weidenbaum S., Bonilla C., *A fundamental Study of the Mixing of Particulate Solids*, "Chemical Engineering Progress", 1955, 27–36.
- [81] Wen X., Jin G., Cui X., Feng X., Lu B., Cai Z., Zhao Y., Fang Y., *Underwater wet laser cladding on 316L stainless steel: A protective material assisted method*, "Optics & Laser Technology", 2019, 111, 814–824.
- [82] Wójtowicz R., *Flow pattern and power consumption in a vibromixer*, "Chemical Engineering Science", 2017, 172, 622–635.
- [83] Xu H., Ma Z., Liu L., Xu X., Xue Z., Xi D., *Study on Influence of Four Various Structure Static Mixers on Mixing Effect During Solvent-Less Compound Mixing.*, Interdisciplinary Research for Printing and Packaging. P. Zhao, Z. Ye, M. Xu, L. Yang, L. Zhang, S. Yan, eds. Springer Singapore. 2022, 316–322.

- 
- [84] Yaralioglu G.G., Wygant I.O., Marentis T.C., Khuri-Yakub B.T., *Ultrasonic Mixing in Microfluidic Channels Using Integrated Transducers*, "Analytical Chemistry", 2004, 76, 3694–3698.
- [85] Yin H., Allinson N.M., *Self-organizing mixture networks for probability density estimation*, "IEEE Transactions on Neural Networks", 2001, 12, 405–411.
- [86] Zarzycki R., Prywer J., *Mechanika płynów*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2022.
- [87] <http://komela.bytom.pl/> [dostęp z dnia 12.03.2022].
- [88] <http://mieszanie.woziwodzki.pl/> [dostęp z dnia 15.03.2022].
- [89] <https://4weld.pl/pl/> [dostęp z dnia 12.03.2022].
- [90] <https://ataszek.pl/> [dostęp z dnia 12.03.2022].
- [91] <https://bts.net.ua/pl/> [dostęp z dnia 15.04.2022].
- [92] <https://icmarket.pl/> [dostęp z dnia 12.03.2022].
- [93] <https://jls-europe.de/pl/> [dostęp z dnia 12.03.2022].
- [94] <https://pl.vwr.com/> [dostęp z dnia 12.03.2022].
- [95] <https://sklep-chemland.pl/> [dostęp z dnia 22.03.2022].
- [96] <https://spomasz.biz.pl/> [dostęp z dnia 12.03.2022].
- [97] <https://www.bionovo.pl/> [dostęp z dnia 18.03.2022].
- [98] <https://www.e-biosan.pl/> [dostęp z dnia 12.03.2022].
- [99] <https://www.grason.pl/> [dostęp z dnia 12.03.2022].
- [100] <https://www.hennlich.pl/> [dostęp z dnia 12.03.2022].
- [101] <https://www.hielscher.com/pl/> [dostęp z dnia 05.05.2022].
- [102] <https://www.ika.com/pl/> [dostęp z dnia 15.03.2022].
- [103] <https://www.indasol.pl/> [dostęp z dnia 21.05.2022].
- [104] <https://www.laboratoria.xtech.pl/> [dostęp z dnia 12.03.2022].
- [105] <https://www.putzsystem.pl/> [dostęp z dnia 13.03.2022].
- [106] <https://www.teknomatik.pl/> [dostęp z dnia 13.03.2022].
- [107] <https://www.verderliquids.com/pl/> [dostęp z dnia 12.03.2022].
- [108] <http://www.labobaza.pl/> [dostęp z dnia 04.04.2022].
- [109] <http://www.mtm-maszyny.pl/> [dostęp z dnia 12.03.2022].
- [110] PN-EN ISO 527-1 – Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu.
- [111] [www.buchiglas.com/pl/](http://www.buchiglas.com/pl/) [dostęp z dnia 18.03.2022].