

Alicja BIEL-TYRALSKA, Tomasz TYRALSKI

e-mail: alicja.biel-tyralska@p.lodz.pl

Instytut Papiernictwa i Poligrafii, Politechnika Łódzka, Łódź

Badania modelowe rozwłóknaczy wysokostężeniowych do makulatury

Wstęp

Dotychczas wykazano wiele inwencji w dążeniu do podniesienia stężenia masy w wannie rozwłóknacza. Dzięki temu zredukowano koszty inwestycyjne przy budowie nowych instalacji oraz zmniejszono koszty eksploatacyjne. W wyniku pracy rozwłóknacza otrzymuje się wodną zawiesinę włókien zawierającą najczęściej obok całkowicie rozdzielonych od siebie włókien również pewną ilość nierozwłóknionych części półproduktu włóknistego. Podstawowy wymóg to uzyskanie przez zawiesinę zdolności do jej przepompowania z wanny rozwłóknacza do następných urządzeń.

Rozwłókniacze wirowe są urządzeniami szeroko stosowanymi w papiernictwie i często maszyny papiernicze otrzymują zawiesinę włóknistą rozczynioną nawet w pięciu rozwłóknaczach wirowych. W związku z tym jednostkowe zapotrzebowanie energii na rozczynianie, wynoszące najczęściej 14÷41 kWh/t (0,05÷0,15 MJ/kg), a czasem przekraczające 100 kWh/t, stanowi poważną pozycję w ogólnym bilansie zapotrzebowania energii w papierni [Goettsching i Pakarinen, 2000].

Rozwłókniacze wirowe mogą pracować przy stężeniu niskim (3÷8%), średnim (10÷12%) i wysokim (15÷18%). Efektywność energetyczna rozwłókniania jest zawsze większa przy wyższych stężeniach. Należy jednak zauważyć, że przy wysokich stężeniach konieczna jest okresowa praca rozwłóknacza wirowego. Zwiększenie stężenia masy w rozwłókniaczu wpływa na zmniejszenie zapotrzebowania energii co jednocześnie oznacza, że wydajność rozwłóknacza przy takich samych rozmiarach wanny może być podwyższona. Jednak możliwość zwiększenia stężenia związana jest zawsze z koniecznością zastosowania odpowiedniego wirnika.

Wirnik śrubowy jest najważniejszym elementem rozwłóknacza wysokostężeniowego i musi być tak zaprojektowany, aby zapewniał w swojej górnej części transport gęstej masy w kierunku dna wanny, natomiast dolna część wirnika jest przystosowana do wyrzucania masy na zewnątrz wirnika w kierunku poziomym, równoległe do dna wanny. Geometria wanny jest dostosowana do średnicy wirnika, natomiast dno jest odpowiednio stożkowo odchylone ku górze, aby zapewnić jak najmniejsze straty energii przy zawracaniu masy w kierunku do góry. Przepływ gęstej masy wywołany ruchem wirnika sprzyja występowaniu sił mechanicznych związanych z ruchem włókien względem cieczy, intensywnym tarciami pomiędzy samymi włóknami, a także z bezpośrednim oddziaływaniem pomiędzy zawiesiną oraz wirnikiem. Interakcja pomiędzy włóknami i wirnikiem, a także interakcja pomiędzy włóknami w sąsiedztwie wirnika mają największy wpływ na rozwłóknianie pęczków (i usuwanie cząstek farby z włókien), a ilość nierozwłóknionych pęczków zależy od ogólnej ilości kontaktów włókien z wirnikiem wywołanych cyrkulacją masy w wannie [Bennington i in., 1998; Roux i Bloch, 2004a,b]. W dążeniu do zwiększenia stężenia masy włóknistej podstawową rolę odgrywa znajomość i przewidywanie zachowania się gęstej zawiesiny włóknistej w warunkach występowania różnych szybkości ścinania.

Parametry geometryczne i kinematyczne wirnika oraz opory ruchu gęstej masy włóknistej o stężeniu C i lepkości pozornej μ_a decydują o intensywności cyrkulacji (częstości cyrkulacji) masy w wannie rozwłóknacza. Ponieważ maksymalne naprężenia ścinające występują w sąsiedztwie powierzchni wirnika, dlatego częstość cyrkulacji odgrywa ważną rolę w analizie kinetyki rozwłókniania. Zawiesiny włókniste stanowią ciągłą strukturę włóknistą, której wytrzymałość jest rezultatem interakcji sąsiadujących ze sobą włókien. Wraz ze wzrostem stężenia zawiesiny rośnie liczba wzajemnych oddziaływań włókien, co wpływa

na zwiększenie wytrzymałości struktury włókien (sieci). Aby wywołać przepływ w zawieszynie muszą być wywarne naprężenia styczne wystarczające do zniszczenia tej struktury. Po osiągnięciu pewnej wartości szybkości ścinania, co wiąże się z zapotrzebowaniem odpowiedniej ilości energii na mieszanie, masa włóknista osiąga stan, w którym struktury włókniste zostają w dużym stopniu zniszczone [Bennington i in., 1996].

Efektywna praca wielu maszyn do przygotowania mas włóknistych, takich jak rozwłókniacze wirowe i inne, związana jest z koniecznością zapewnienia przejścia zawiesiny włóknistej w stan fluidyzacji, który oznacza uzyskanie ścinania (płynięcia) w całej objętości masy włóknistej. Towarzyszy temu występowanie naprężeń ścinających τ_d o wartości wymaganej do zniszczenia struktury włóknistej w zawieszynie.

Na rynku spotyka się wiele rozwłóknaczy wirowych różniących się konstrukcją i każdy z nich ma charakterystyczne, optymalne warunki pracy, takie jak jednostkowe zapotrzebowanie energii i stężenie, które w praktyce muszą być określane doświadczalnie w rezultacie wielu prób. W badaniach procesu rozwłókniania wykorzystuje się zazwyczaj urządzenia o małych rozmiarach, aby zminimalizować koszty badań przy jednoczesnej możliwości znacznego rozszerzenia programu badań. Bardzo pomocne są w tym względzie badania modelowe przeprowadzane w mniejszych instalacjach, przedstawione m.in. w tej pracy.

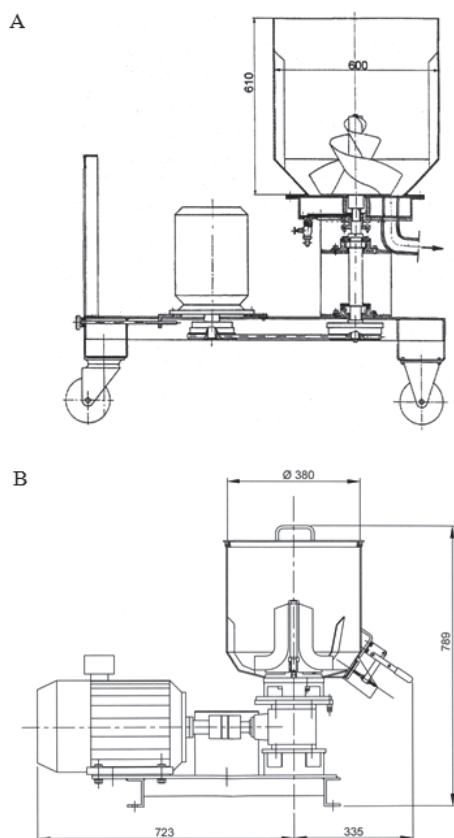
Rozwłókniacze laboratoryjne

Na rys. 1A przedstawiono wysokostężeniowy rozwłókniacz laboratoryjny *RL-1* z wirnikiem helikoidalnym konstrukcji własnej. Pojemność wanny tego rozwłóknacza wynosi 0,15 m³, a moc silnika napędowego 5,5 kW. Częstość obrotów wirnika może być zmieniana do 1000 obr/min dzięki zastosowaniu przetwornika częstotliwości (falownika). Z kolei na rys. 1B przedstawiono rozwłókniacz laboratoryjny firmy *Kadant-Lamort*, również z wirnikiem śrubowym i z wanną o pojemności 25 dm³.

W przyjętej metodyce badań modelowych w skali laboratoryjnej i ułamkowo-technicznej został wykorzystany ścisły związek między wartością lepkości pozornej μ_a , a siłami tarcia decydującymi o przebiegu i efektywności procesu selektywnego rozwłókniania.

W rozczyntach przemysłowych z wirnikiem śrubowym o dużej pojemności wanny wartość wskaźnika mocy jednostkowej ϵ_v jest tym mniejsza, im większa jest pojemność wanny i zmienia się w zakresie od 22 kW/m³ ($V_r = 5$ m³) do ok. 15 kW/m³ ($V_r = 30$ m³). Pomiary reologiczne na reometrach przystosowanych do mas gęstych o wysokich stężeniach umożliwiają wyznaczenie wartości lepkości pozornej zawiesiny włóknistej o danym stężeniu przy określonej częstości obrotów wirnika. Im mniejsza jest wartość lepkości pozornej, tym mniejsza jest efektywność rozwłókniania.

Jednym z ważniejszych parametrów wpływających na efektywność rozwłókniania przy wysokim stężeniu jest częstość cyrkulacji zależna od strumienia objętości Q_w masy włóknistej transportowanej przez wirnik. Zdolność wirnika helikoidalnego do wywołania odpowiednio intensywnej cyrkulacji gęstej masy w wannie rozwłóknacza zależy w sposób zasadniczy od złożonej geometrii powierzchni śrubowej łopatek oraz od właściwości reologicznych zawiesiny włóknistej. Zastosowanie większego stężenia masy w procesie rozczyniania i rozwłókniania wymaga zawsze użycia odpowiedniego wirnika i dostosowanej do niego geometrii wanny.



Rys. 1. Rozwłókniacze laboratoryjne, A – rozwłókniacz konstrukcji własnej, B – rozwłókniacz laboratoryjny PL 25 firmy Kadant-Lamort z wanną o pojemności 25 dm³

Metodyka badań

Badania modelowe dotyczyły rozwłókniania makulatury z pojemników wielomateriałowych po płynnej żywności.

Badania szybkości penetracji wody w warstwę kartonową laminatów

Siły powodujące rozdrabnianie surowca, w procesie rozwłókniania odpadowych opakowań po płynach spożywczych, muszą być większe od wytrzymałości surowca włóknistego czyli warstwy kartonowej oraz także od sił adhezji folii z tą warstwą. Jednocześnie siły te nie mogą być zbyt duże, gdyż folie będą podlegały nadmiernemu rozdrabnianiu. W procesie rozwłókniania mechaniczna wytrzymałość surowca włóknistego musi być zredukowana przez nawilżanie. Powoduje to niszczenie wiązań wodorowych pomiędzy włóknami. Dlatego możliwie szybkie i całkowite nawilżenie makulatury jest nadzwyczaj ważne dla efektywnego rozczyniania. W przypadku laminatów, takich jak odpadowe pojemniki kartonowe po płynach spożywczych penetracja wody w strukturę kartonu jest utrudniona przez barierową funkcję folii PE i Alu. Pojemniki te przed wprowadzeniem do rozwłókniacza muszą być wcześniej pocięte na mniejsze kawałki. Zjawisko odkrawędziowej penetracji wody (od krawędzi przecięcia opakowania kartonowego, w głąb warstwy kartonowej jest niekorzystne z punktu widzenia trwałości pojemników kartonowych wypełnionych płynem spożywczym. Zjawisko pęcznienia i związane z tym powiększanie porów, szczególnie intensywne w przypadku masy chemo-termo-mechanicznej CTMP, powoduje stopniową degradację wytrzymałości strefy przykrawędziowej opakowania kartonowego. Natomiast ocena penetracji wody w warstwę kartonową laminatów pod kątem recykulacji tych opakowań, jest całkowicie odmienna. Nawilżanie i pęcznienie warstwy kartonowej w procesie rozczyniania i rozwłókniania tego rodzaju makulatury jest korzystne, gdyż wpływa na osłabienie wiązań pomiędzy włóknami, ale przede wszystkim wpływa na osłabienie sił wiążących folie z warstwą kartonową. Dlatego ocena dynamiki procesu nawilżania warstwy kartonowej laminatów ma znaczenie praktyczne w optymalizacji technologii ich rozczyniania i rozwłókniania.

W badaniach własnych próbki o rozmiarach 1 × 3 cm poddawano pomiarom szybkości penetracji wody w warunkach dynamicznych, tzn. w trakcie mieszania przy pełnej fluidyzacji masy z wykorzystaniem specjalnego mieszadła turbinowego o średnicy 0,072 m firmy Cole Parmer Instrument Co., które charakteryzuje się pewną zdolnością do rozwłókniania. Mieszadło to przedstawiono na rys. 2A. Natomiast na rys. 2B przedstawiono urządzenie napędowe i pomiarowe. Mierzy ono w sposób ciągły wartości momentu obrotowego (skręcającego) i zmiennej częstości obrotów. Częstość obrotów mieszadła dobierano tak, aby cała próbka masy podlegała mieszaniu w warunkach pełnej fluidyzacji.

Pomiary wartości naprężenia stycznego τ oraz lepkości pozornej μ_a przy zmianie szybkości ścinania przeprowadzano na zbudowanym we własnym zakresie remetrze cylindrycznym do mas gęstych.

Korzystając z wyznaczonej wartości szybkości ścinania $\dot{\gamma}$ oraz naprężenia stycznego τ obliczano wartość odpowiadającą im lepkości pozornej $\mu_a = \tau / \dot{\gamma}$.

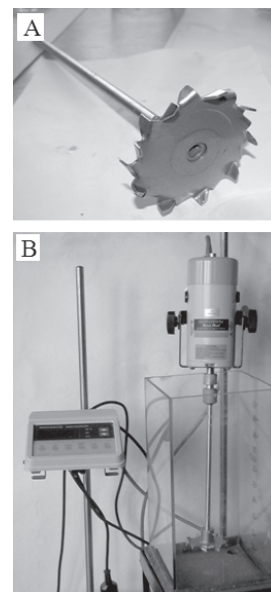
W ten sposób uzyskiwano wykres $\mu = f(\dot{\gamma})$ dla szybkości ścinania w zakresie od ok. 8 s⁻¹ do ok. 95 s⁻¹. Wyznaczona linia trendu z równaniem (funkcją) aproksymacyjnym pozwala na wyznaczenie lepkości pozornej odpowiadającej szybkości ścinania $\dot{\gamma} = kn$ wykorzystywanej w badaniach modelowych szybkości penetracji wody w warstwę kartonową laminatów z zastosowaniem specjalnego mieszadła turbinowego (Rys. 2).

Znajomość lepkości pozornej masy włóknistej odpowiadającej szybkości ścinania w sąsiedztwie mieszadła umożliwia z kolei wyznaczenie wartości działającego naprężenia stycznego $\tau = \mu_a \dot{\gamma}$. Dla masy o stężeniu 6,5% przy zastosowanej częstości obrotów mieszadła turbinowego 900 obr/min obserwowano pełną jej fluidyzację ($\tau = 100,23$ Pa), więc przy takiej częstości obrotów przeprowadzono ocenę dynamiki penetracji odkrawędziowej wody w temperaturze 20°C i 50°C. Odpowiadający jej wskaźnik mocy jednostkowej wynosił ok. 15,78 kW/m³. Jest to wartość wielokrotnie przewyższająca wartość dysypacji mocy wyznaczoną np. dla stężenia 4,0%, która wynosiła 3,10 kW/m³. Jest to spowodowane znacznym wzrostem częstości obrotów mieszadła wymaganej przy tym stężeniu dla fluidyzacji masy.

Wartość naprężenia stycznego charakteryzującego tarcie wewnętrzne przy tym stężeniu i częstości obrotów zapewniających fluidyzację wynosiła ok. 100 N/m² i była zbliżona do wartości naprężenia stycznego dla stężenia 4,0%, wynoszącego 99,5 N/m². Widać więc, że dla tego typu wirnika optymalne stężenie jest niższe i bliższe 4,0% aniżeli 6,5% z punktu widzenia zużycia energii.

Jednakże głównym celem tych badań była ocena dynamicznej penetracji wody. Podobnie jak wcześniej, do masy makulatury OCC (Old Corrugated Containers) o stężeniu 6,5% dodawano wycięte próbki 2 × 3 cm z laminatów i co 1 min pobierano próbki do pomiaru masy po nawilżeniu. Już po 8–10 min osiągnięto stopień nawilżenia taki, jak w przypadku masy o stężeniu 4,0% dopiero po czasie prawie 30 min. Można więc stwierdzić, że nawilżanie laminatów powinno przebiegać w warunkach dynamicznych przy możliwie dużym stężeniu, które zapewnia większą wartość sił tarcia czyli naprężeń stycznych oraz najlepiej przy podwyższonej temperaturze 40–50°C.

Aby umożliwić odkrawędziowe wnikanie wody w warstwę kartonową najkorzystniej jest, gdy laminaty są wstępnie pocięte przez rozdrabniacz na kawałki o rozmiarach zbliżonych orientacyjnie do rozmiarów kartki pocztowej. Umożliwia to skrócenie czasu rozczyniania i rozwłókniania w wannie rozwłókniacza wirowego i w rezultacie oszczędność energii. Proces rozdrabniania makulatury z opakowań kartonowych po płynach spożywczych (laminatów) można realizować także całkowicie w roz-



Rys. 2. Zastosowane mieszadło turbinowe (A) oraz Servodyne Mixer i Mixer Controller firmy Cole Parmer Instrument Co (B).

włókniażu wirowym, ale wtedy wymagany czas obróbki się wydłuża i istnieje zawsze obawa nadmiernego rozdrobnienia folii, szczególnie w rozwłókniażach niskostężeniowych.

Badania modelowe rozwłókniania

Przyjęta metodyka w pierwszym etapie badań modelowych przerobu makulatury z laminatowych opakowań kartonowych obejmowała:

- pocięcie opakowań na niszczarce na paski szerokości 3 mm i następnie ich pocięcie na odcinki o długości ok. 5 cm,
- nawilżenie pasków w wodzie w trakcie ich mieszania (ok. 40 min)
- selektywne rozwłóknienie z wykorzystaniem rozwłókniaża laboratoryjnego ze specjalnym mieszadłem turbinowym rozwłókniającym (Rys. 2),
- odseparowanie folii PE i Alu z wykorzystaniem laboratoryjnego płaskiego sortownika trzęsakowego z sitem z otworami o średnicy 5 mm,
- badania otrzymanych mas włóknistych oraz papierów doświadczalnych wykonanych na aparacie *Rapid-Koetchen*.

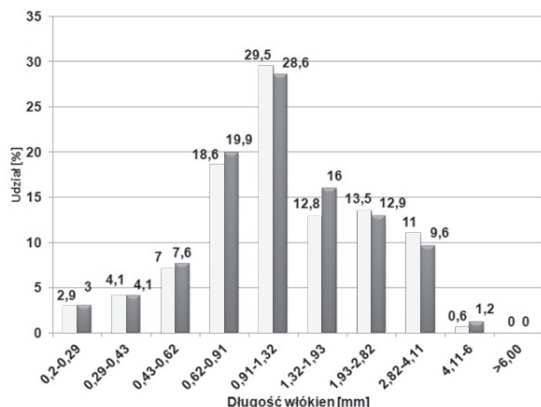
Badaniami poddano dwa rodzaje opakowań z których wytworzono następujące rodzaje mas włóknistych:

- Masa A uzyskana z warstwy kartonowej laminatów wykonanych z mas bielonych (trudnych do rozwłóknienia z uwagi na zaklejenie środkami nadającymi częściową wodoodporność),
- Masa B uzyskana z warstwy kartonowej laminatów wykonanych z niebielonych mas celulozowych i mechanicznych.

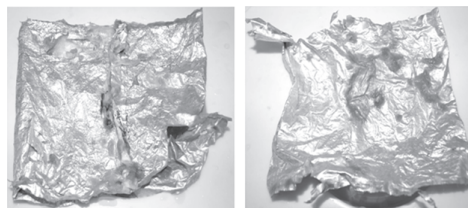
Uzyskane masy poddano badaniom morfologicznym z wykorzystaniem francuskiej aparatury *Morfi* oraz urządzenia do pomiaru długości włókien typu *ADV-3* z *Uniwersytetu Technicznego* w Bratysławie, w którym włókna przepływały przez kapilare, a pomiar odbywał się z wykorzystaniem lasera. Uzyskane przykładowe wyniki pomiarów długości włókien na tym aparacie przedstawiono na rys. 3.

W kolejnych etapach badań przeprowadzono próby rozwłókniania makulatury z opakowań kartonowych po płynnej żywności z wykorzystaniem rozwłókniaży wysokostężeniowych. Wykorzystano opakowania po mleku, z których wycięto paski o długości 12,5 cm i szerokości 7 cm. Jednorazowy wsad w każdej z prób wynosił 1,075 kg pociętej makulatury i 10 litrów wody.

W pierwszej próbie przygotowana makulatura po wrzuceniu do rozwłókniaża laboratoryjnego została zalana wodą i rozpoczęto rozwłóknianie. W drugim przypadku makulatura została namoczona w 10 litrach wody przez 4 godziny, po czym przetrzucono ją do rozwłókniaża laboratoryjnego francuskiej firmy *Kadant-Lamort*, który przedstawiono na rys. 1B. Podczas rozwłókniania w odstępie 5 min poddawano wazeni jeden wycięty pasek laminatu. W trakcie rozwłókniania coraz większa część warstwy kartonowej przylegającej do folii aluminiowej zostaje od niej oddzielona. W początkowej fazie rozwłókniania następuje oddzielenie folii polietylenowej oraz odkrawędziowa penetracja wody wywołująca pęcznienie włókien w warstwie kartonowej. Całkowite oddzielenie warstwy kartonowej od folii PE i Alu oraz jej rozwłóknienie zachodzi po ok. 40 min w przypadku laminatów wstępnie namoczonych, natomiast laminaty nie moczone wymagają ok. 50 min.



Rys. 3. Przykładowy rozkład długości włókien wyznaczony na aparacie *Morfi* (masa A – słupki jasne i B – słupki ciemne)



Rys. 4. Folie aluminiowe po 25 min rozwłókniania przy stężeniu 10%

W kolejnej próbie wykorzystano rozwłókniaż laboratoryjny RL-1, który przedstawiono na rys. 1A. Opakowania kartonowe po płynnej żywności zostały przecięte na pół i wstępnie przez kilka godzin moczone. Wsad do rozwłókniaża stanowiło 5,4 kg makulatury z laminatów i 50 litrów wody co daje stężenie 10%. W trakcie rozwłókniania, co 5 min pobierano 1 litrową próbkę masy. Po usunięciu z niej rozwłóknionej masy wazono pozostałą folię aluminiową z przylegającym do niej kartonem (po oplukaniu i usunięciu z niej wody za pomocą ręcznika papierowego). W ten sposób wyznaczano krzywą rozwłókniania. Po 20÷25 min folie aluminiowe były praktycznie pozbawione włókien i co najważniejsze same nie ulegały rozdrobnieniu w rozwłóknianiu wysokostężeniowym (10%) [Tyralski i Biel-Tyralska, 2008] i łatwo mogły być odseparowane w sortowniku bębnowym. Na rys. 4 pokazano folie aluminiowe prawie całkowicie pozbawione włókien po 25 min rozwłókniania.

W następnej próbie z wykorzystaniem rozwłókniaża *RL-1* wsad do wanny stanowiło 9,75 kg makulatury z tektury falistej (OCC) pociętej na niszczarce w paski, 1 kg opakowań kartonowych po płynach spożywczych pociętych na kawałki 5 × 5 cm oraz 100 litrów wody, co daje masę o stężeniu ok. 10%. Po czasie 25 min rozwłókniania warstwa kartonowa została całkowicie oddzielona od folii, a same folie nie uległy rozdrobnieniu. W próbie tej mierzono także stopień penetracji wody do próbek laminatu (5 × 5 cm). W czasie 20 min masa próbki z ok. 11 g uległa zwiększeniu do ok. 26 g. Pomiar masy badanych próbek zakończono po 20 min rozwłókniania ponieważ folia aluminiowa i polietylenowa zostały oddzielone od jeszcze nie rozwłóknionego kartonu. Po ok. 35 min rozwłókniania warstwa kartonowa była już rozwłókniona, a folie pozostały nierozdrobnione.

Separację dużych kawałków folii (sortowanie wstępne) przeprowadzano z wykorzystaniem pralki wirnikowej wyposażonej w sito w strefie dna. Łagodne mieszanie sprzyja również oddzieleniu od folii resztkowych włókien. W instalacji przemysłowej funkcję tę najlepiej realizują sortowniki bębnowe, najczęściej z otworami o średnicy 12 lub 16 mm.

Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały celowość rozdrabniania makulatury z opakowań kartonowych po płynach spożywczych [Kikiewicz i Mroziński, 1998] z wykorzystaniem rozdrabniacza typu *shredder* przed jej wprowadzeniem do rozwłókniaża. Umożliwia to zmniejszenie zapotrzebowania energii na rozwłóknienie i ogranicza lub eliminuje rozdrabnianie folii PE i Alu, jeśli stężenie w wannie rozwłókniaża wynosi ok. 10 %.

LITERATURA

- Göttsching, L. and H. Pakarinen (eds). 2000. *Recycled fiber and deinking*. Book 7 in Papermaking Science and Technology Series. Gullichsen J., Paulapuro H. (eds), TAPPI Press and Finnish Paper Engineers' Association, Atlanta, GA
- Bennington C.P.J., Kerekes R. J., 1996. Power requirements for pulp suspension fluidization. *Tappi J.*, 79, nr 2, 253-258
- Bennington C.P.J., Smith J.D., Sui O.S., 1998. The effect of mechanical action on waste paper defibering and ink removal in repulping operations. *J. Pulp Paper Sci.*, 24, 341-348
- Kikiewicz Z., Mroziński A., 1998. Model recyklingu opakowań po napojach. *Ekologia i Technika*, 6, nr 2, 40-43
- Roux J.C., Bloch J.F., 2004a Krótki przegląd operacji procesu dezintegracji. Cz. 1. Operacje rozczyniania i rozwłókniania. *Przegl. Papier.*, 60, nr 4, 203-210
- Roux J.C., Bloch J.F., 2004b. Krótki przegląd operacji procesu dezintegracji. Cz. 2. Rozczynianie – kluczowa operacja w odbarwianiu makulatury. *Przegl. Papierniczy*, 60, nr 5, 241-245
- Tyralski T., Biel-Tyralska A., 2008. Rozwłóknianie makulatury przy średnim i wysokim stężeniu. *Przegl. Papier.*, 64, nr 7, 379-390