

Politechnika Łódzka

ZESZYTY NAUKOWE Nr 1103

KONRAD OLEJNIK

RÓWNOWAGA DYNAMICZNA
W UKŁADZIE WODNO-MASOWYM
MASZYNY PAPIERNICZEJ

ŁÓDŹ 2011

POLITECHNIKA ŁÓDZKA

ZESZYTY NAUKOWE Nr 1103

ROZPRAWY NAUKOWE, Z. 413

KONRAD OLEJNIK

RÓWNOWAGA DYNAMICZNA
W UKŁADZIE WODNO-MASOWYM
MASZINY PAPIERNICZEJ

ŁÓDŹ 2011

ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ
SCIENTIFIC BULLETIN OF THE TECHNICAL UNIVERSITY
OF LODZ
BULLETIN SCIENTIFIQUE
DE L'UNIVERSITÉ POLYTECHNIQUE DE LODZ
НАУЧНЫЕ ЗАПИСКИ
ЛОДЗИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
WISSENSCHAFTLICHE HEFTE
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT IN LODZ

Redaktor Działu: **prof. dr hab. inż. Piotr Wodziński**

Recenzenci: **prof. dr hab. Danuta Nicewicz**
dr hab. inż. Ewa Drzewińska, prof. PŁ

© Copyright by Politechnika Łódzka 2011

Adres Redakcji – Адрес Редакции – Editor's Office
Adresse de Redaction – Schriftleitungsadresse:

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ
90-924 Łódź, ul. Wólczańska 223
tel./fax 42-684-07-93
e-mail: zamowienia@info.p.lodz.pl
www.wydawnictwa.p.lodz.pl

ISSN 0137-4834

Nakład 140 egz. Ark. druk. 9. Papier offset. 80 g, 70 x 100
Druk ukończono w listopadzie 2011 r.
Wykonano w Drukarni Offsetowej Quick-Druk, 90-562 Łódź, ul. Łąkowa 11

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	5
WYKAZ SKRÓTÓW	8
WYKAZ SYMBOLI	10
WPROWADZENIE	15
1. UKŁAD WODNO-MASOWY MASZYNY PAPIERNICZEJ	18
2. RÓWNOWAGA DYNAMICZNA W UKŁADZIE WODNO-MASOWYM MASZYNY PAPIERNICZEJ JAKO ZESPÓŁ RÓWNOWAG CZĄSTKOWYCH	22
2.1. Równowaga wodna	23
2.2. Równowaga masowa	30
2.3. Równowaga fizykochemiczna	35
2.4. Równowaga mikrobiologiczna	41
2.5. Równowaga energetyczna	44
2.6. Współdziałanie równowag cząstkowych	47
3. CEL I ZAKRES PRACY	49
4. ANALIZA NAJWAŻNIEJSZYCH CZYNNIKÓW WPŁYWAJĄCYCH NA RÓWNOWAGĘ MASOWĄ I FIZYKOCHEMICZNĄ UKŁADU WODNO-MASOWEGO MASZYNY PAPIERNICZEJ – WYZNACZANIE PARAMETRÓW WEJŚCIOWYCH I WARTOŚCI GRANICZNYCH DLA MODELU	50
4.1. Metodyka badań	52
4.2. Badania nad powstawaniem frakcji drobnej w ciągu technologicznym papierni	55
4.3. Rozdział poszczególnych frakcji masy papierniczej w trakcie jej odwadniania na sicie maszyny papierniczej	58
4.4. Zmiana stopnia spęcznienia (WRV) frakcji włóknistej oraz frakcji drobnej masy papierniczej. Wpływ wskaźnika WRV włókien na właściwości wytrzymałościowe papieru	59
4.5. Szybkość wydzielania się substancji rozpuszczalnych z mas włóknistych	63
4.6. Wpływ jednostkowego zużycia wody świeżej na równowagę fizykochemiczną w maszynie papierniczej	71
5. MODEL UKŁADU WODNO-MASOWEGO MASZYNY PAPIERNICZEJ	74
5.1. Założenia wstępne, wybór narzędzi i ogólna budowa modelu	76
5.2. Bilans wodno-masowy przygotowania masy papierniczej i doprowadzenia masy do maszyny papierniczej	83
5.3. Bilans wodno-masowy sekcji „mokrej” maszyny papierniczej	84
5.4. Bilans wodno-masowy II obiegu wodnego	94

5.5. Ogólne zasady tworzenia bilansu substancji rozpuszczonych	95
5.6. Model zdolności ruchowej maszyny papierniczej	96
5.7. Weryfikacja modelu	101
6. ANALIZA WYBRANYCH ASPEKTÓW WSPÓLDZIAŁANIA RÓWNOWAG CZĄSTKOWYCH W UKŁADZIE TECHNOLOGICZNYM MASZYNY PAPIERNICZEJ – PRZYKŁADY DZIAŁANIA OPRACOWANEGO SYMULATORA	108
6.1. Wpływ ograniczania zużycia wody świeżej na równowagę masową i fizykochemiczną w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej	109
6.2. Wpływ zmian retencji w sekcji formującej maszyny papierniczej na przebieg procesu wytwarzania papieru	115
WNIOSKI OGÓLNE	121
WNIOSKI SZCZEGÓŁOWE	124
LITERATURA	126
SUMMARY	136
ZAŁĄCZNIK I – SKRÓCONY OPIS PROGRAMU WETEND SIMULATOR	138
CHARAKTERYSTYKA ZAWODOWA AUTORA	146

STRESZCZENIE

W każdym prawidłowo funkcjonującym, ustabilizowanym i ciągłym procesie technologicznym ustala się pewna dynamiczna równowaga, którą w technologii papieru ogólnie określa się jako równowagę technologiczną. Równowagę tę definiują określone wskaźniki kryterialne (fizyczne, fizykochemiczne, chemiczne), które umożliwiają jednoznaczną charakterystykę stanu procesu technologicznego. Najczęściej wskaźniki te mają również decydujący wpływ na przebieg tego procesu. W przypadku produkcji papieru równowagę technologiczną w procesie kształtują równowagi cząstkowe: wodna, masowa, fizykochemiczna, cieplna i mikrobiologiczna. Podstawowymi wskaźnikami, które charakteryzują te równowagi, są: jednostkowe zużycie wody świeżej, stężenie substancji stałych i rozpuszczonych w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej, temperatura panująca w tym układzie oraz ilość i rodzaj rozwijających się w nim mikroorganizmów.

W przeszłości, kiedy stosowano surowce włókniste najwyższej jakości i nie istniały ograniczenia zużycia wody świeżej, układ technologiczny procesu wytwarzania papieru był stosunkowo mało skomplikowany i posiadał otwartą strukturę liniową. Panująca w nim równowaga technologiczna nie była więc czynnikiem, który mógłby w sposób istotny ograniczać przebieg produkcji. Natomiast współczesny przemysł papierniczy podlega ciągłym zmianom wymuszonym przez czynniki ekonomiczne, środowiskowe i społeczne. Efektem tych zmian jest m.in. zwiększanie wykorzystania surowców wtórnych, ograniczanie zużycia wody świeżej i ilości odprowadzanych ścieków. Ponieważ specyfika procesu wytwarzania papieru wymusza stosowanie dużych ilości wody, obniżanie zapotrzebowania na ten surowiec odbywa się poprzez zastępowanie go wodami poprodukcyjnymi krążącymi w procesie. Uwzględniając fakt, że w trakcie produkcji papieru zachodzą złożone zjawiska fizykochemiczne, współczesny układ technologiczny maszyny papierniczej można przyrównać do wielostopniowego reaktora z częściowym zawracaniem wybranych strumieni reagentów z różnych etapów przebiegu procesu. Strumienie cyrkulacyjne, niosąc określony ładunek substancji stałych i rozpuszczonych, oddziałują w sposób wtórny na proces produkcyjny, w efekcie czego układ technologiczny nabiera cech systemu okresowo nieustalonego, obciążonego dodatkowo szeregiem opóźnień. Proces produkcji papieru należy ponadto do systemów wieloparametrowych typu MIMO (Multiple Input Multiple Output). Oznacza to, że przebieg tego procesu jest uzależniony od wielu parametrów, które często są ze sobą wzajemnie sprzężone.

Wszystkie te czynniki powodują, że do sterowania takim procesem konieczne jest stosowanie najbardziej wyrafinowanych wieloprocessorowych systemów komputerowych, w których wykorzystuje się m.in. hierarchiczne sterowanie rozproszone (DCS), wielowymiarowe sterowanie predykcyjne (MPC) z modelami cząstkowymi, logikę rozmytą, sieci neuronowe i inne.

W dalszym ciągu nie daje to jednak 100% gwarancji poprawnego przebiegu procesu produkcyjnego.

Zmniejszanie jednostkowego zużycia wody świeżej staje się obecnie szczególnie trudnym problemem w technologii papieru. Efektem ciągłego, wtórnego wykorzystywania wód obiegowych jest bowiem znacząca zmiana równowagi technologicznej panującej w procesie produkcyjnym. W skrajnym przypadku może to prowadzić do destabilizacji tego procesu, a w efekcie do obniżenia jego wydajności i pogorszenia jakości produktu. Dodatkową trudnością jest fakt, że zmiany poszczególnych parametrów mogą zachodzić w różnych przedziałach czasowych.

Badania nad równowagą technologiczną procesu produkcji papieru mają więc obecnie duże znaczenie praktyczne, jednakże wyniki uzyskiwane w trakcie pomiarów wykonywanych w warunkach przemysłowych często są mało precyzyjne. Wynika to głównie ze wzrostu stopnia skomplikowania współczesnych układów technologicznych, skrócenia czasów trwania poszczególnych operacji jednostkowych, a także na skutek działania układów automatyki korygujących na bieżąco poszczególne parametry procesu. Dalszy rozwój i wszelkie działania optymalizacyjne w tym przemyśle coraz bardziej zaczynają więc zależeć od dokładności modeli matematycznych oraz programów komputerowych, które umożliwiają symulowanie i analizowanie określonych sytuacji bez konieczności ingerencji w układ rzeczywisty.

Powyższe czynniki spowodowały podjęcie prac mających na celu opracowanie modelu, a następnie całej aplikacji umożliwiającej badania zmian zachodzących w równowadze technologicznej układu wodno-masowego maszyny papierniczej ze szczególnym uwzględnieniem cząstkowych równowag: wodnej, masowej i fizykochemicznej. Prace na modelem były poprzedzone badaniami doświadczalnymi, dzięki którym określono szybkość uwalniania się zanieczyszczeń stałych i rozpuszczalnych przenikających do wód technologicznych papierni z uwzględnieniem rodzaju surowca włóknistego, jego stężenia i temperatury. Eksperymentalnie wyznaczono też zależności pomiędzy ograniczeniem zużycia wody świeżej a ilością zanieczyszczeń kumulujących się w wodach obiegowych. Wyznaczono ogólny wzór, który pozwala określić zmianę wskaźnika opisującego daną równowagę cząstkową w zależności od jednostkowego zużycia wody świeżej. Na podstawie danych doświadczalnych oraz rozważań teoretycznych wyznaczono równania pozwalające na ilościowe określenie wielkości zmian zachodzących w równowadze technologicznej w modelowanym układzie oraz wyznaczenie czasu trwania tych zmian. Równania te wykorzystano następnie w opracowanym symulatorze układu wodno-masowego maszyny papierniczej. Aplikacja ta została wyposażona w interfejs zbliżony wyglądem i funkcjonalnością do rzeczywistego systemu sterowania maszyną papierniczą. Oprócz równań bilansowych dotyczących badanych równowag cząstkowych, w programie uwzględniono typowe dla maszyn papierniczych układy sterowania automatycznego (oparte zarówno

o regulatory lokalne typu PID, jak i układy sterowania hierarchicznego), co pozwoliło dokładniej odtwarzać zachowanie się rzeczywistego układu przemysłowego. Matematyczny opis modelowanego układu technologicznego zajął ponad 1500 linii kodu, natomiast cały program obejmuje ponad 20.000 linii kodu. Statyczna weryfikacja opracowanego modelu i programu symulacyjnego wykazała, że narzędzie to odwzorowuje zmiany zachodzące w badanym procesie technologicznym z zadowalającą dokładnością. Dzięki temu stało się możliwe dokładniejsze, ilościowe określenie stanu równowagi technologicznej panującej w badanym układzie technologicznym oraz wyznaczenie czasów ustalania się poszczególnych równowag cząstkowych w badanym układzie. W wyniku przeprowadzonych symulacji wykazano m.in., że zmniejszenie jednostkowego zużycia wody świeżej pociąga za sobą wykładniczy wzrost stężenia zawiesiny oraz substancji rozpuszczalnych w wodzie obiegowej w maszynie papierniczej oraz wydłuża czas ustalenia się nowej równowagi technologicznej w badanym układzie technologicznym. Przykładowo, zmniejszenie jednostkowego zużycia wody świeżej z 220 m³/t do 5 m³/t spowodowało dwukrotny wzrost stężenia zawiesiny w wodzie obiegowej i wydłużenie czasu stabilizacji się równowagi technologicznej z około 2,5 minuty do ponad 130 minut, co w warunkach rzeczywistych może stanowić istotne utrudnienie dla efektywnej kontroli i regulacji procesu produkcyjnego. Stwierdzono ponadto, że najszybciej stabilizuje się równowaga masowa, natomiast najdłużej ustala się równowaga fizykochemiczna związana z organicznymi substancjami rozpuszczalnymi. Opracowany program umożliwił również analizę nieustalonych stanów przejściowych będących odpowiedzią układu technologicznego na wprowadzane w nim zmiany.

Opracowane narzędzie oraz przedstawione wyniki badań stanowią przyczynek do uzupełnienia dotychczasowej wiedzy na temat funkcjonowania układu wodno-masowego maszyny papierniczej.

WYKAZ SKRÓTÓW

- BAT – Best Available Technology (najlepsza dostępna technologia),
b.s. – Bezwzględnie sucha (masa),
- BREF – BAT Reference dokument (dokument referencyjny dotyczący najlepszych dostępnych technologii),
- CD – Cross Direction (kierunek prostopadły do biegu maszyny papierniczej),
- CEL – Cutting Edge Length (jednostkowa długość tnąca w młynie, wyrażana w m/s),
- CEPI – Confederation of European Paper Industries
(Stowarzyszenie Europejskiego Przemysłu Papierniczego),
- CHP – Combined Heat and Power (kogeneracja, jednoczesne wytwarzanie energii cieplnej i elektrycznej),
- ChZT – Chemiczne Zapotrzebowanie Tlenu (wyrażane w mg O₂/dm³)
- CTMP – Chemi-Thermo-Mechanical Pulp (masa chemotermomechaniczna),
- DCS – Distributed Control System (system sterowania rozproszonego),
- DIP – Deinked Pulp (masa makulaturowa odbarwiona),
- DS – Dissolved Solids (substancje rozpuszczone),
- EC – Electric Conductivity (przewodność elektryczna wyrażana w μS/cm),
- JZW – Jednostkowe Zużycie Wody świeżej (wyrażane w m³/t produktu),
- MD – Machine Direction (kierunek równoległy do biegu maszyny papierniczej),
- MP – Maszyna Papiernicza,
- MPC – Model Predictive Control (system sterowania predykcyjnego w oparciu o model procesu),
- OCC – Old Corrugated Containers (masa makulaturowa na bazie tektury falistej),
- OMG – Old Magazines (masa makulaturowa na bazie czasopism),
- ONP – Old Newspapers (masa makulaturowa na bazie gazet codziennych),
- OWP – Office Waste Papers (masa makulaturowa na bazie papierów biurowych),
- PID – Proportional-Integral-Derivative controller (regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący),
- Sabl – Masa celulozowa siarczanowa bielona,
- SaNbl – Masa celulozowa siarczanowa niebielona,
- SEC – Specific Energy Consumption (jednostkowe zużycie energii mielenia wyrażane w kWh/t b.s. masy),
- SEL – Specific Edge Load (jednostkowe obciążenie krawędzi tnącej młyna wyrażane w J/m),
- SR – Smarność masy papierniczej (wyrażana w stopniach Schoppera-Rieglera – °SR),
- SS – Suspended Solids (substancje nierozpuszczone – zawiesina),

- TDS – Total Dissolved Solids (całkowita ilość substancji rozpuszczonych wyrażana w mg/dm^3),
- TMP – Thermo Mechanical Pulp (masa termomechaniczna),
- TS – Total Solids (całkowita ilość substancji stałych),
- VFA – Volatile Fatty Acids,
- WRV – Water Retention Value (wskaźnik zatrzymania wody lub inaczej stopień spęcznienia masy włóknistej),
- ZLE – Zero Liquid Effluent system (bezściekowy proces przemysłowy)

WYKAZ SYMBOLI*

- A – pole powierzchni szczeliny wypływowej wlewu maszyny papierniczej, m
- b_w – szerokość formowanej wstęgi papierniczej, m
- C_p – ciepło właściwe, kJ/kg*K
- e_p – uchyb regulacji związany z członem proporcjonalnym regulatora PID,
- e_i – uchyb regulacji związany z członem całkującym regulatora PID,
- e_d – uchyb regulacji związany z członem różniczkującym regulatora PID,
- EFFLUX – współczynnik wyprzedzenia sita,
- E_{ws} – energia cieplna doprowadzana w wodzie świeżej,
- E_{ps} – energia cieplna doprowadzana w półproduktach włóknistych i surowcach,
- E_{ne} – energia cieplna doprowadzana w nośnikach energii,
- EX – energia użyteczna układu,
- E_{pap} – energia cieplna odprowadzana z papierem,
- E_{sc} – energia cieplna odprowadzana w ściekach,
- E_{st} – straty energii cieplnej w procesie,
- F_{we} – strumień materiału wchodzącego do procesu, kg/s,
- F_{wy} – strumień materiału opuszczającego proces, kg/s,
- g_r – gramatura papieru, g/m²,
- h – entalpia, kJ/kg,
- K_p – współczynnik wzmocnienia członu proporcjonalnego regulatora PID,
- K_i – współczynnik wzmocnienia członu całkującego regulatora PID,
- K_d – współczynnik wzmocnienia członu różniczkującego regulatora PID,
- \overline{m}_{pulp} – tablica wektorowa określająca początkowe parametry wejściowe surowca,
- \overline{m}_{pap} – tablica wektorowa określająca zakładane parametry produktu,
- m_0 – całkowita masa sucha doprowadzona do wlewu maszyny papierniczej, kg/s,
- m_1 – całkowita masa sucha doprowadzona do wlewu wraz z I wodą podsitową, kg/s,
- m_H – całkowita ilość masy suchej doprowadzanej do wlewu maszyny papierniczej, kg/s,
- m_{ww} – całkowita ilość masy suchej odprowadzanej z części rejestrowej do I wody podsitowej, kg/s,
- $m_{ww(wl)}$ – masa suchej frakcji włóknistej odprowadzanej z części rejestrowej do I wody podsitowej, kg/s
- $m_{ww(fr)}$ – masa suchej frakcji drobnej odprowadzanej z części rejestrowej do I wody podsitowej, kg/s,
- m_m – całkowita masa sucha doprowadzana do sekcji prasowej maszyny

- papierniczej, kg/s,
- m_p – całkowita masa sucha opuszczająca sekcję „mokrą” maszyny papierniczej, kg/s,
- N_M – ilość mikroorganizmów w układzie wodno-masowym papierni,
- N_{ws} – ilość mikroorganizmów wprowadzanych z wodą,
- N_p – ilość mikroorganizmów wprowadzanych do układu z powietrza,
- N_{ps} – ilość mikroorganizmów wprowadzanych z półproduktami włóknistymi,
- N_r – przyrost mikroorganizmów w układzie wodno-masowym,
- N_{pap} – ilość mikroorganizmów odprowadzanych z układu z papierem,
- N_{sc} – ilość mikroorganizmów odprowadzanych ze ściekami,
- N_o – ilość mikroorganizmów odprowadzanych z osadami,
- N_o – ilość mikroorganizmów obumierających w układzie,
- P_{MP} – wydajność maszyny papierniczej g/min,
- p_{HBX} – ciśnienie we wlewie, Pa
- Q_0 – strumień gęstej masy papierniczej płynący z kadzi maszynowej do wlewu maszyny papierniczej (wartość ustawiana zaworem gramatury), m^3/s
- Q_1 – strumień rozcieńczonej masy papierniczej płynący do wlewu maszyny papierniczej, m^3/s
- Q_2 – strumień wody odpływający z I strefy formowania do kadzi I wody podsitowej, m^3/s
- Q_3 – strumień materiału (wstęga papiernicza) opuszczający sekcję formującą MP, m^3/s
- Q_4 – strumień I wody podsitowej cyrkulującej w I obiegu wodnym, m^3/s
- Q_5 – strumień masy papierniczej odpływającej z kadzi II wody podsitowej, m^3/s
- Q_6 – strumień II wody podsitowej zawracanej do kadzi I wody podsitowej, m^3/s
- Q_8 – strumień II wody podsitowej kierowanej do urządzenia odwłókniającego, m^3/s
- Q_9 – całkowity strumień wody sklarowanej z urządzenia odwłókniającego, m^3/s
- Q_{10} – strumień wody umownie świeżej wykorzystanej w miejsce wody świeżej w maszynie papierniczej, m^3/s
- Q_{11} – strumień wody umownie świeżej wykorzystanej do rozwłókniania surowca włóknistego, m^3/s
- Q_{12} – strumień masy odzyskanej po filtrze tarczowym zawracany do kadzi maszynowej, m^3/s
- Q_{14} – strumień masy (wstęga papiernicza) wychodzący z sekcji prasowej, m^3/s
- Q_{DL} – całkowity strumień masy na linii suchej w sekcji formującej maszyny papierniczej, m^3/s

- Q_{fw} – strumień wody świeżej do natrysków myjących sito, m^3/s
- Q_{Hwl} – strumień frakcji włóknistej w masie papierniczej doprowadzanej do wlewu MP, m^3/s
- Q_{Hfr} – strumień frakcji drobnej w masie papierniczej doprowadzanej do wlewu MP, m^3/s
- Q_K – strumień masy (wstęgi papierniczej) odprowadzanej z sekcji formującej MP, m^3/s
- Q_{ws} – strumień wody świeżej, m^3/s
- Q_{przel} – strumień I wody podsitowej przelewającej się do kadzi II wody podsitowej, m^3/s
- Q_{ps} – strumień wody zawartej w surowcach, półproduktach i pomocniczych środkach chemicznych, m^3/s
- Q_{pras} – strumień wody odprowadzanej w sekcji prasowej MP, m^3/s
- Q_{pap} – strumień wody odprowadzanej z produktem (papierem), m^3/s
- Q_{sc} – strumień wody odprowadzanej w ściekach, m^3/s
- Q_{par} – strumień wody odparowanej z suszonej wstęgi papieru, m^3/s
- Q_{ref} – strumień masy papierniczej z układu mielenia, m^3/s
- Q_{VBOX} – strumień wody odprowadzanej przez skrzynki ssące w sekcji formującej MP, m^3/s
- Q_{ww} – strumień I wody podsitowej odprowadzanej w sekcji formującej MP, m^3/s
- R – retencja, %
- R_{BOX} – retencja w strefie skrzynek ssących, %
- R_{fp} – retencja pierwszego przejścia, %
- $R_{fp(wl)}$ – retencja pierwszego przejścia dla frakcji włóknistej, %
- $R_{fp(fr)}$ – retencja pierwszego przejścia dla frakcji drobnej, %
- $R_{(fr)}$ – retencja frakcji drobnej, %
- R_s – retencja systemu, %
- R_{wire} – retencja na sicie formera, %
- $R_{(wl)}$ – retencja frakcji włóknistej, %
- sm – samozerwalność papieru, m
- sm_{max} – maksymalna samozerwalność papieru dla danej masy włóknistej (równ. 4.7), m
- s_N – suchość nominalna wstęgi papierniczej, %
- s_K – suchość końcowa wstęgi papierniczej, %
- t_{90} – czas wydzielania się 90% wszystkich substancji rozpuszczalnych zawartych w masie papierniczej, s
- T – temperatura, °C
- U – energia wewnętrzna, $kJ\ kg^{-1}$
- WRV_m – stopień spęcznienia masy, %
- WRV_{w0} – stopień spęcznienia włókien w masie niemielonej, %
- WRV_w – stopień spęcznienia włókien, %
- WRV_{fr} – stopień spęcznienia frakcji drobnej, %

- v_s – prędkość maszyny papierniczej (sekcji formującej), m min^{-1}
 V – objętość, m^3
 V_{km} – objętość kadzi maszynowej, m^3
 $V_{\text{km(max)}}$ – maksymalna objętość kadzi maszynowej, m^3
 $V_{\text{odwłók}}$ – objętość kadzi wody odwłóknionej, m^3
 V_r – objętość układu technologicznego papierni, m^3
 V_{silo} – objętość kadzi I wody podsitowej, m^3
 $V_{\text{silo(max)}}$ – maksymalna objętość kadzi I wody podsitowej, m^3
 V_{s2w} – objętość kadzi II wody podsitowej, m^3
 $V_{\text{s2w(max)}}$ – maksymalna objętość kadzi II wody podsitowej, m^3
 x_{in} – ułamek masowy ilości suchej substancji w surowcu włóknistym na wejściu modelu,
 x_0 – całkowity ułamek masowy ilości gęstej masy papierniczej odpływający z kadzi maszynowej,
 x_1 – całkowity ułamek masowy ilości rozcieńczonej masy papierniczej płynącej do wlewu maszyny papierniczej,
 x_2 – całkowity ułamek masowy ilości substancji stałych odpływających z I strefy formowania sekcji formującej,
 x_3 – całkowity ułamek masowy ilości substancji stałych zawartych we wstędze papieru opuszczającej sekcję formującą,
 x_4 – całkowity ułamek masowy ilości substancji stałych zawartych w kadzi I wody podsitowej,
 x_5 – całkowity ułamek masowy ilości substancji stałych zawartych w kadzi II wody podsitowej,
 $x_{5(\text{fr})}$ – ułamek masowy udziału frakcji drobnej w suchej masie substancji stałych w kadzi II wody podsitowej,
 x_6 – całkowity ułamek masowy ilości substancji stałych zawartych w strumieniu wody sklarowanej po filtrze tarczowym,
 x_7 – całkowity ułamek masowy ilości substancji stałych zawartych w strumieniu odpływającym z kadzi wody sklarowanej,
 x_{12} – całkowity ułamek masowy ilości substancji stałych zawartych w strumieniu masy odzyskanej po filtrze tarczowym,
 $x_{12(\text{fr})}$ – ułamek masowy udziału frakcji drobnej w suchej masie substancji stałych odzyskanych po urządzeniu odwłókniającym,
 x_{DL} – ułamek masowy ilości masy we wstędze papieru na linii suchej w sekcji formującej,
 x_{fr} – ułamek masowy ilości frakcji drobnej,
 x_{fW} – ułamek masowy ilości zawiesiny w wodzie umownie świeżej,
 x_{H} – ułamek masowy ilości masy papierniczej we wlewie maszyny papierniczej,
 $x_{\text{H(wł)}}$ – ułamek masowy ilości frakcji włóknistej w masie papierniczej we wlewie maszyny papierniczej,

- $x_{H(fr)}$ – ułamek masowy ilości frakcji drobnej w masie papierniczej we wlewie maszyny papierniczej,
- $x_{W(fr)}$ – ułamek masowy ilości frakcji drobnej we wstędze papierniczej opuszczającej sekcję formującą maszyny papierniczej,
- x_{km} – ułamek masowy substancji stałych zawartych w kadzi maszynowej,
- x_K – ułamek masowy substancji stałych zawartych w strumieniu Q_K ,
- x_r – średnie stężenie zawiesiny w układzie technologicznym papierni,
- x_T – ułamek masowy ilości zawiesiny w wodzie odpływającej z sita maszyny papierniczej,
- $x_{ws(n)}$ – ułamek masowy ilości substancji „n” zawartej w wodzie świeżej,
- $x_{ps(n)}$ – ułamek masowy ilości substancji „n” zawartej w wodzie w surowcach i półproduktach,
- $x_{pap(n)}$ – ułamek masowy ilości substancji „n” zawartej w wodzie odprowadzanej z produktem (papierem),
- $x_{sc(n)}$ – ułamek masowy ilości substancji „n” zawartej w wodzie odprowadzanej w ściekach,
- $x_{o(n)}$ – ułamek masowy ilości substancji „n” zawartej w wodzie odprowadzanej w osadach i odpadach stałych,
- x_{WW} – ułamek masowy ilości substancji zawartych w I wodzie podsitowej odprowadzanej w sekcji formującej MP,
- x_{VBOX} – ułamek masowy ilości substancji zawartych w wodzie odprowadzanej przez skrzynki ssące MP,
- α_{DF} – efektywność (sprawność) odwłókniania w filtrze tarczowym,
- φ – współczynnik wypływu uwzględniający rzeczywistą prędkość wypływu masy z wlewu na sito w stosunku do prędkości teoretycznej,
- ρ – gęstość, kg/m^3

* W pracy stosowano jednostki miar zgodne z układem SI. Jednakże w niektórych miejscach opracowania można także napotkać masę wyrażaną w tonach. Wynika to z faktu, że badania związane z technologią papieru są zazwyczaj ściśle związane z rzeczywistymi warunkami przemysłowymi. W wielu przypadkach głównymi odbiorcami wyników tych badań są pracownicy przemysłu papierniczego. Dlatego też nawet w literaturze naukowej z tego zakresu, zarówno polskiej, jak i zagranicznej, często stosuje się jednostki, które są powszechnie wykorzystywane w przemyśle.

WPROWADZENIE

Papier jest materiałem produkowanym głównie z naturalnych i odnawialnych surowców, można więc go zaliczyć do jednego z bardziej ekologicznych produktów wytwarzanych przez człowieka. Ciągły wzrost zapotrzebowania na wytwory papierowe na świecie jest jedną z konsekwencji rozwoju cywilizacyjnego na Ziemi. Szczególnie dynamiczny wzrost produkcji papieru rozpoczął się od połowy XIX wieku, a w XX wieku produkcja ta podwajała się średnio co 20 lat. W 2010 roku na świecie wytworzono ok. 400 mln ton tego materiału (CEPI Annual Statistics 2010).

Z racji uwarunkowań ekonomicznych i środowiskowych współczesna przemysłowa produkcja papieru należy do bardzo złożonych procesów technologicznych. Najogólniej rzecz ujmując, proces ten polega na doprowadzeniu strumieni surowców (włókien celulozowych, substancji wypełniających, środków zaklejających, pomocniczych środków chemicznych) do maszyny papierniczej, w której następuje konsolidacja wstęgi papierniczej. W trakcie tej operacji zachodzi zjawisko rozdziału strumieni surowców, przy czym każdy surowiec podlega innym prawom rozdziału. Gotowy produkt w postaci wysuszonej wstęgi papieru opuszcza układ, zaś część surowców, które nie zostały zatrzymane w tej wstędze, jest ponownie zawracana wraz z wodami technologicznymi do procesu produkcyjnego. Zmiany stężenia poszczególnych składników w wodzie technologicznej wpływają w sposób wtórny na przebieg całego procesu. Cały ten proces może być przyrównany do wielostopniowego reaktora z częściowym zawracaniem wybranych strumieni reagentów pochodzących z różnych etapów przebiegu procesu. W rezultacie układ technologiczny nabiera cech systemu okresowo nieustalonego, obciążonego dodatkowo wieloma opóźnieniami.

Określenie rozdziału poszczególnych składników masy papierniczej oraz ich wtórnego oddziaływania na proces technologiczny jest czynnością bardzo złożoną i trudną do zrealizowania bez pomocy specjalistycznych narzędzi. Dodatkowe komplikacje wynikają z faktu, że papier jako produkt masowy musi być wytwarzany z wielką precyzją, ale również z maksymalnie dużą wydajnością. Największe współczesne maszyny papiernicze są w stanie produkować już ponad 3000 ton papieru na dobę z liniową prędkością formowanej wstęgi papieru przekraczającą 120 km/h. W procesie tym czas trwania wielu operacji jednostkowych uległ skróceniu do ułamków sekund, co znacznie utrudnia sterowanie procesem oraz powoduje problemy związane z utrzymaniem wysokiej jakości produktu. W przypadku zaburzeń technologicznych badania nieustabilizowanego dynamicznie układu są nieprecyzyjne.

Pod koniec XX i w XXI wieku zaczęto w przemyśle papierniczym przykładać szczególną wagę do poszanowania środowiska naturalnego i dostosowania technologii do wymogów zrównoważonej gospodarki surowcami. W praktyce oznacza to przede wszystkim większe wykorzystanie surowców wtórnych i ograniczenie zużycia wody świeżej. Konsekwencją obu tych czynni-

ków jest wzrost zanieczyszczenia wód technologicznych, które muszą być następnie powtórnie wykorzystane w procesie w zastępstwie wody świeżej. Powoduje to dalszy wzrost stężenia zarówno zawiesiny, jak i substancji rozpuszczonych w tych wodach, w wyniku czego pojawiają się znaczne zmiany różnych parametrów produkcyjnych (np. fizykochemicznych właściwości materiałów, ich stężeń, temperatury). Parametry te są w trakcie produkcji utrzymywane względem siebie w określonej dynamicznej równowadze zwanej równowagą technologiczną. W rezultacie niekontrolowanych zmian tych parametrów może nastąpić zachwianie tej równowagi i zdestabilizowanie procesu produkcyjnego.

Pomimo tych zagrożeń wydaje się, że przy kurczących się zasobach czystych wód w środowisku naturalnym, w najbliższej przyszłości nieuniknione jest dalsze ograniczanie zużycia wody świeżej w przemyśle papierniczym. Prace nad rozwiązaniem tego problemu rozpoczęto już w drugiej połowie XX wieku. Na przełomie lat 80. i w latach 90. udało się w Polsce zredukować zapotrzebowanie na wodę świeżą z ok. 150-100 m³ na tonę papieru do ok. 20-50 m³/t. W 2009 r. średnie zużycie wody w europejskim przemyśle papierniczym wynosiło ok. 30-35 m³/t papieru, podczas gdy wytyczne Unii Europejskiej odnośnie Najlepszych Dostępnych Technologii (BAT) wskazują, że każda papiernia powinna zużywać tylko ok. 10-20 m³ wody na każdą tonę produkowanego papieru (BREF Reference Document for Pulp and Paper Industry).

O ile redukcja zużycia wody świeżej do poziomu rzędu ok. 40 m³/t wymagała w większości przypadków jedynie uporządkowania układu technologicznego i przeszkolenia załogi, to osiągnięcie poziomu rekomendowanego przez BAT jest możliwe tylko dzięki wprowadzaniu nowych, bardziej zaawansowanych rozwiązań technologicznych. Można do nich zaliczyć zarówno nowe rodzaje aparatury procesowej (urządzenia filtrujące, odwłókniające), zastosowanie wielowymiarowej oceny jakości wód obiegowych (np. oznaczania pH, ChZT, potencjału elektrokinetycznego, zapotrzebowania jonowego przewodności właściwej, potencjału redox, mętności, koloru) czy wprowadzenie zaawansowanej chemizacji procesu (koagulantów, flokulantów, środków przeciwiopiennych, biocydów).

Obecnie, szczególnie trudne wydaje się trwałe zmniejszenie zużycia wody świeżej poniżej 10 m³/tonę papieru. Z tego względu konieczne są dalsze badania naukowe w celu dokładnego poznania i opisanie zjawisk, które mogą wystąpić w układzie technologicznym maszyny papierniczej w wyniku dostosowywania tego układu do współczesnych wymogów ekonomiczno-środowiskowych. W tym przypadku szczególnie istotna wydaje się szybka ocena wielkości zmian zachodzących w ciągu technologicznym oraz czasu potrzebnego do osiągnięcia nowego stanu równowagi. Badania tego typu należą do niezwykle skomplikowanych zadań, ponieważ ze względu na wielowymiarowy i interdyscyplinarny charakter zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami, wymagają one, obok gruntownej wiedzy z zakresu technologii papieru, zaawansowanej znajomości takich dziedzin nauki, jak inżynieria procesowa,

ochrona środowiska, mikrobiologia, mechanika maszyn, automatyka, informatyka oraz ekonomia. Dlatego też najczęściej próby rozwiązania problemów z tego zakresu są mniej lub bardziej obszernymi badaniami cząstkowymi. Dopiero połączenie wyników z wielu takich badań umożliwia uzyskanie optymalnych rezultatów.

W świetle powyższych faktów podjęto w niniejszej pracy badania nad problematyką dotyczącą dynamicznej równowagi w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej, a w szczególności wpływu ograniczania zużycia wody świeżej na stan tej równowagi. Celem pracy było opracowanie narzędzia pozwalającego na szybką ocenę zmian zachodzących w poszczególnych równowagach cząstkowych. Główny nacisk położono na analizę zmian zachodzących w równowagach: masowej i fizykochemicznej pod wpływem celowej zmiany równowagi wodnej. Wyniki tych badań mogą przyczynić się do zwiększenia wiedzy na temat zjawisk zachodzących w trakcie dostosowywania omawianego procesu produkcyjnego do współczesnych wymogów ekonomiczno-środowiskowych.

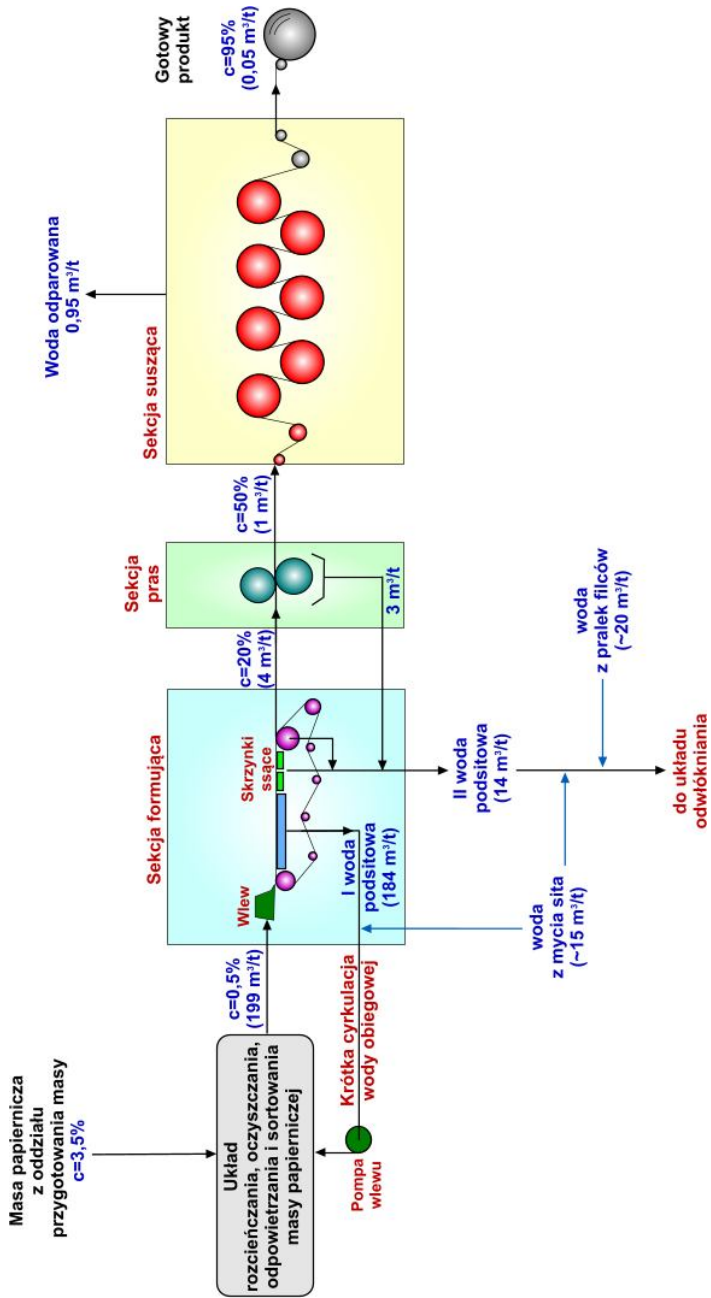
1. UKŁAD WODNO-MASOWY MASZYNY PAPIERNICZEJ

Maszyna papiernicza wraz z przyległym do niej układem wodno-masowym jest precyzyjnym i niezwykle skomplikowanym agregatem przemysłowym, którego działanie w decydującym stopniu wpływa na strukturę i właściwości użytkowe gotowego wytworu papierniczego.

Sama maszyna składa się z trzech głównych sekcji: formującej, prasowej oraz suszącej (rys. 1.1). W sekcji formującej, nazywanej też sekcją sitową, odbywa się proces formowania wstęgi papierniczej. W tym miejscu z zawiesziny masy papierniczej o stężeniu ok. 0,2-1,2% powstaje mokra wstęga papieru o ściśle określonej strukturze. Operacja ta odbywa się przy jednoczesnym, intensywnym odwadnianiu tej wstęgi. O skali tego zjawiska świadczy fakt, że odprowadzana w tej sekcji woda stanowi ok. 98% całkowitej ilości wody usuwanej ze wstęgi w maszynie papierniczej. Biorąc pod uwagę wartości bezwzględne, są to natężenia przepływu rzędu 2-6 m³/s (w zależności od wydajności maszyny papierniczej). Większa część tej wody (ok. 185 m³/t papieru) to tzw. woda rejestrowa lub I woda podsitowa, która odpływa z początkowej części sekcji formującej. Do I wody podsitowej trafia ponadto część wody z natrysków mycia sita. W dalszej części sekcji formującej, obejmującej obszar próżniowych skrzynek ssących oraz tzw. wyżymak (wał ssący), usuwane jest ok. 10 m³/t. Jest to tzw. II woda podsitowa. Do tego strumienia trafia również część wody z natrysków myjących sito. Wstęga papiernicza opuszczająca sekcję formującą osiąga suchość rzędu ok. 16-23%. W tym momencie wytrzymałość mechaniczna wstęgi jest na tyle dostateczna, że umożliwia przeniesienie jej do sekcji prasowej maszyny papierniczej, w której następuje dalsze odwadnianie (do suchości ok. 38-50%), a także zagęszczanie struktury papieru. Woda z sekcji prasowej trafia wraz z wodą z mycia filców prasowych do obiegu II wody podsitowej. Stanowi ona ok. 1,5% całkowitej ilości wody usuwanej ze wstęgi w maszynie papierniczej.

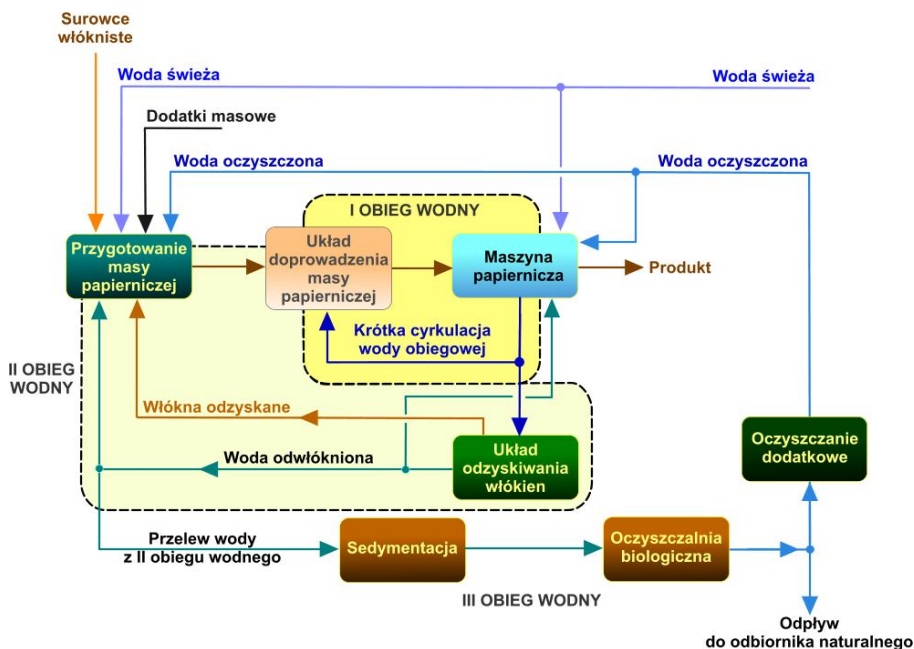
Z sekcji prasowej wstęga papiernicza jest przenoszona do sekcji suszącej. Tutaj, poprzez kontakt mokrej wstęgi papieru z powierzchnią cylindrów ogrzewanych parą wodną, następuje intensywne odparowanie wody, której nie można usunąć w sposób mechaniczny. W trakcie tej operacji jednostkowej usuwane jest ok. 1,1 m³/t wody stanowiącej zwykle mniej niż 1% całkowitej ilości wody usuwanej w maszynie papierniczej. Ostatnie cylindry sekcji suszącej nie są ogrzewane, a ich zadaniem jest schłodzenie wysuszonej już wstęgi papierniczej. Końcowa suchość papieru opuszczającego sekcję suszącą maszyny papierniczej wynosi ok. 93-95%.

Należy dodać, że sekcja formująca i prasowa tworzą tzw. sekcję „mokrą” maszyny papierniczej i jest częścią układu wodno-masowego maszyny papierniczej oraz całej papierni. Struktura tego układu wynika zarówno z właściwości przetwarzanego w niej surowca, jak i uwarunkowań ekonomiczno-środowiskowych.



Rys. 1.1.1. Uproszczony schemat przepływu strumieni wody i masy w układzie technologicznym maszyny papirniczej

W typowym układzie wodno-masowym papierni (rys. 1.2) można wyróżnić trzy podstawowe obiegi wodne, przy czym pierwsze dwa należą bezpośrednio do układu technologicznego maszyny papierniczej. Pierwszy, tzw. krótki obieg wodny, obejmuje wodę rejestrową odpływającą z formowanej wstęgi papierniczej oraz część wody z natrysków myjących sito. Woda ta cyrkuluje w układzie: kadź I wody podsitowej – pompa wlewu – wlew maszyny papierniczej i jest wykorzystywana do rozcieńczania masy papierniczej dopływającej z oddziału przygotowania masy.



Rys. 1.2. Przykładowy schemat blokowy układu wodno-masowego papierni

Ze względu na fakt bezpośredniego ponownego wykorzystywania w procesie jakości tej wody ma największe znaczenie dla pracy maszyny papierniczej. Przy omawianiu wody obiegowej lub wód cyrkulacyjnych w niniejszym opracowaniu należy pamiętać, że terminy te dotyczą właśnie I wody podsitowej (chyba, że w tekście będzie wyraźnie zaznaczone, że chodzi o inny rodzaj wody).

Woda ze skrzynek ssących, wyzymaka, z części natrysków myjących sito wraz z wodą odciekającą z sekcji pras i wodą z pralek filców prasowych jest nazywana II wodą podsitową. Do wody tej może też trafiać nadmiar I wody podsitowej. II woda podsitowa krąży w tzw. drugim obiegu wodnym, zwanym czasami obiegiem odwłókniającym. Zadaniem tego układu jest odzyskiwanie materiału włóknistego w celu ograniczenia jego strat i jednocześnie oczy-

szczanie wody w celu rozszerzenia możliwości jej ponownego zastosowania w procesie. W obiegu tym zwykle zainstalowane są urządzenia służące do usuwania cząstek stałych zawiesiny obecnej w wodach odciekowych (np. filtry tar czowe, sita łukowe itp.). Trzeci obieg wodny istnieje tylko wtedy, gdy papiernia posiada oczyszczalnię ścieków, do której odpływają wszystkie wody odciekowe z papierni. Zadaniem tego układu jest zabezpieczenie odbiornika przed zrzutem zawartych w ściekach zanieczyszczeń: zawiesiny i substancji rozpuszczonych, ale coraz częściej także odzyskanie wody o stosunkowo wysokiej czystości do ponownego użycia w układzie wodno-masowym papierni (Szwarcstajn, 1983, Holik, 2006, Ek et al., 2009). W nowoczesnych zakładach przemysłowych po filtracji biologicznej wprowadza się więc często kolejny stopień oczyszczania w oparciu o np. filtrację membranową. Tak oczyszczona woda może być użyta w praktycznie każdym punkcie ciągu technologicznego, włączając w to natryski i uszczelnienia pomp.

Konfiguracja układu technologicznego, w której występuje kilka układów wód cyrkulacyjnych powoduje znaczne skomplikowanie całego procesu produkcyjnego, który nabywa cech układu okresowo nieustalonego, jednakże dzięki temu jest on wstępnie przygotowany do pracy przy małym zapotrzebowaniu na wodę świeżą.

2. RÓWNOWAGA DYNAMICZNA W UKŁADZIE WODNO-MASOWYM MASZYNY PAPIERNICZEJ JAKO ZESPÓŁ RÓWNOWAG CZĄSTKOWYCH

W każdym prawidłowo funkcjonującym, ustabilizowanym, ciągłym procesie technologicznym ustala się pewna dynamiczna równowaga tego procesu, którą w technologii papieru ogólnie określa się mianem równowagi technologicznej. Na równowagę tę składają się określone wielkości fizyczne, fizykochemiczne, chemiczne, parametry technologiczne i właściwości samego układu technologicznego, które w danym przypadku umożliwiają właściwe przeprowadzenie procesu technologicznego. W zależności od specyfiki procesu, wielkościami fizycznymi, które tworzą tę równowagę mogą być np. strumienie energii cieplnej, strumienie materiałów i ich właściwości, różnice stężeń, ciśnień itp. Z punktu widzenia inżyniera procesowego użyteczne są oczywiście tylko te wielkości, które mają istotne znaczenie dla właściwego przebiegu procesu i jakości produktu. Wielkości te muszą być ponadto możliwe do zmierzenia i wyrażenia za pomocą skończonej wartości liczbowej.

W technologii papieru równowaga dynamiczna procesu technologicznego jest w skrócie nazywana „równowagą technologiczną”. Termin ten został wprowadzony przez Przybysza (1995), który ogólnie sklasyfikował czynniki składające się na tę równowagę oraz wskazał podstawowe zależności zachodzące pomiędzy tymi czynnikami. Według tego autora równowaga technologiczna układu wodno-masowego opiera się na bilansie następujących składników:

- wody,
- substancji stałych,
- substancji rozpuszczonych,
- mikroorganizmów,
- energii (ciepła).

W konsekwencji równowagę technologiczną układu wodno-masowego maszyny papierniczej tworzą następujące równowagi cząstkowe:

- równowaga wodna,
- równowaga masowa,
- równowaga fizykochemiczna,
- równowaga mikrobiologiczna,
- równowaga energetyczna (cieplna).

Niezwykle ważny jest fakt, że równowaga technologiczna jest określeniem stanu panującego w pewnym układzie fizycznym. Układ ten stanowi integralną część prowadzonego procesu, którego celem jest uzyskanie określonego efektu (produktu). Zatem równowaga technologiczna musi być rozpatrywana również z uwzględnieniem struktury tego układu (ciągu technologicznego), a także jakości produktu (rys. 2.1).

Przykładowo, produkcja papieru w środowisku kwaśnym pociąga za sobą konieczność zastosowania materiałów konstrukcyjnych o podwyższonej odporności na korozję. Z kolei stosowanie surowców makulaturowych wymaga zainstalowania odpowiednich urządzeń oczyszczających i sortujących oraz stosowania właściwych pomocniczych środków chemicznych. Poprawnie zaprojektowany proces technologiczny powinien więc posiadać odpowiednie urządzenia, armaturę oraz systemy sterowania dostosowane do przewidywanej równowagi technologicznej (opisanej za pomocą określonych, krytycznych parametrów procesu). Fizyczny układ technologiczny musi umożliwiać wykonanie niezbędnych działań sterujących jako reakcji na przewidywane zmiany równowagi technologicznej spowodowane np. wpływem czynników zewnętrznych (zaburzeń) czy celowym działaniem człowieka. Są to warunki konieczne dla utrzymania ciągłości i stabilności ruchowej procesu oraz uzyskania właściwej jakości produktu. Ograniczenia fizycznego układu technologicznego są wyznacznikiem zakresu dopuszczalnych zmian w tym układzie. Przekroczenie tych granic przez którykolwiek z parametrów krytycznych prowadzi do destabilizacji procesu.



Rys. 2.1. Miejsce równowagi technologicznej w procesie produkcyjnym

2.1. Równowaga wodna

W procesie wytwarzania papieru woda jest drugim – obok surowca włóknistego – kluczowym elementem determinującym przebieg cyklu produkcyjnego. Bierze ona udział w następujących operacjach technologicznych:

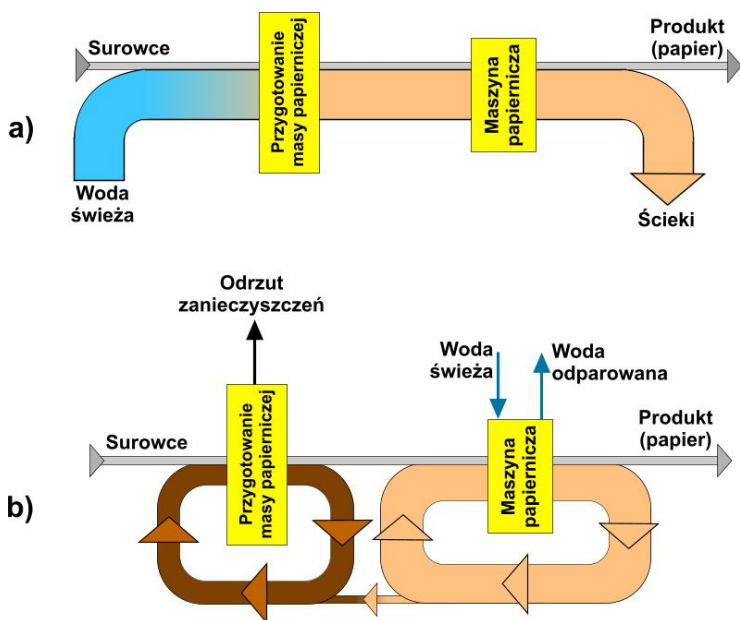
- transport surowców i substancji odpadowych,
- przygotowanie półproduktów włóknistych i masy papierniczej,
- kształtowanie zdolności papierotwórczej włókien roślinnych,

- rozcieńczanie masy papierniczej,
- formowanie wstęgi papierniczej,
- utrzymywanie czystości elementów maszyny papierniczej i urządzeń towarzyszących.

Rola wody jest szczególnie istotna w procesie kształtowania zdolności papierotwórczej surowca włóknistego. W trakcie mielenia – w wyniku występowania specyficznych zjawisk fizycznych i fizykochemicznych – obecność wody pozwala na uplastycznienie włókien, co w dalszych etapach procesu produkcyjnego umożliwia wytworzenie wstęgi papierniczej o pożądanej strukturze i wysokich właściwościach wytrzymałościowych. W tym miejscu woda może być więc traktowana jako swego rodzaju fizykochemiczny „reagent”. Ponadto woda jest używana jako czynnik:

- chłodzący,
- uszczelniający,
- smarujący,
- grzewczy (w postaci pary).

Miarą zapotrzebowania na wodę świeżą w układzie technologicznym papirni jest tzw. jednostkowe zużycie wody świeżej wyrażane w m^3 na jednostkę wytworzonego produktu.



Rys. 2.1.1. Dwa skrajne przypadki gospodarki wodno-masowej papirni:
a) obieg wodny całkowicie otwarty, b) obieg wodny całkowicie zamknięty

Cechą charakterystyczną procesu produkcji papieru jest wewnętrzne, wysokie zapotrzebowanie na wodę, które w praktyce jest bardzo trudno ograniczyć. Fakt ten wynika bezpośrednio z właściwości stosowanych surowców włóknistych. Masa papiernicza jest heterogenicznym medium, w skład którego wchodzi naturalne włókna roślinne, które silnie wchłaniają wodę, pęcznieją (Jayme et al., 1944-1966, Maloney et al., 1998, Przybysz 1971, Scallan et al., 1993) i już w niewielkich stężeniach są zdolne do flokulacji (Jokinen i Ebeling, 1985, Steen, 1990). Właściwości te znacznie utrudniają zarówno uzyskiwanie i utrzymywanie jednorodnej i stabilnej zawiesiny włóknistej, jak również jej przetwarzanie w celu uzyskania produktu o pożądanych właściwościach użytkowych. Dlatego też w celu zwiększenia stabilności masy papierniczej, w procesie produkcyjnym stosuje się duże rozcieńczenia. Jak już wspomniano w rozdziale 1, woda stanowi 99,5-99,8% masy papierniczej doprowadzanej do maszyny papierniczej. Jeżeli przeliczy się to na jednostkowe zużycie wody, to okaże się, że w układzie technologicznym papierni istnieją operacje jednostkowe, które lokalnie wymagają rozcieńczeń masy papierniczej rzędu 200-500 m³/tonę papieru. Uwzględniając dodatkowo wodę potrzebną do uszczelnień, natrysków, pomp próżniowych itp. okazuje się, że realne, jednostkowe zużycie wody świeżej niezbędne do funkcjonowania maszyny papierniczej może wynosić nawet 600-700 m³/t (Wiggins, 1998). Z tego względu jeszcze na początku XX wieku, kiedy wytwórnie papieru pracowały przy znacznie bardziej otwartym obiegu wodnym, wskaźnik jednostkowego zużycia wody w przemyśle papierniczym osiągał wartości ok. 150-200 m³/t (rys. 2.1.1a).

Ze względów technologicznych i ekonomicznych, jednostkowe zużycie wody świeżej obniżono obecnie do ok. 20-50 m³/t, a ponadto wciąż dąży się do możliwie maksymalnego zamknięcia układu wodno-masowego i zastąpienia wody świeżej wodą technologiczną, krążącą w obiegu zamkniętym (rys. 2.1.1b). W niektórych papierniach osiągnięto już poziom 5-10 m³/t.

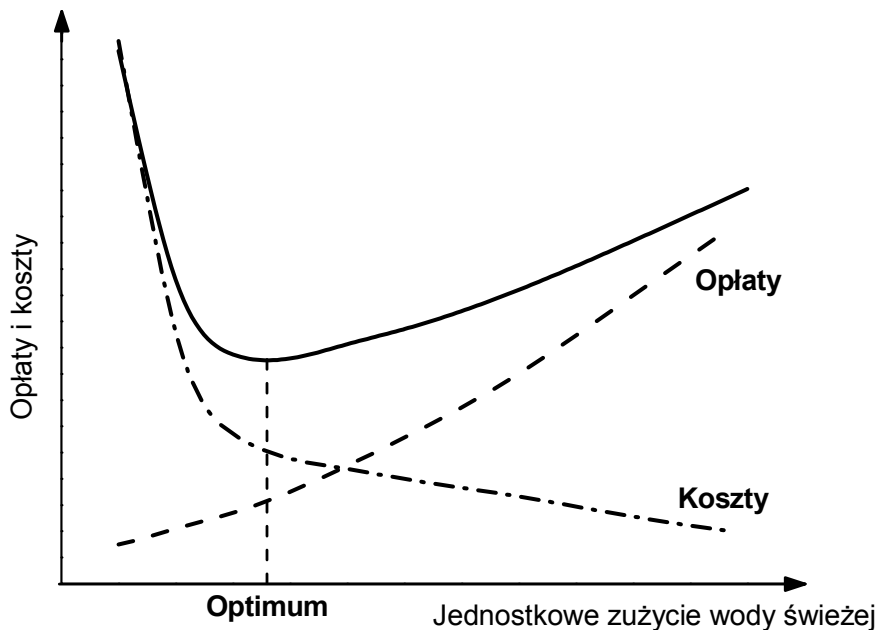
Wszelkie działania w kierunku zmniejszania jednostkowego zużycia wody świeżej zależą od wspomnianych już czynników ekonomicznych. Są to opłaty za:

- wodę świeżą,
- zrzut ścieków,
- składowanie i/lub utylizację odpadów,

oraz koszty:

- oczyszczania wody technologicznej,
- oczyszczania ścieków,
- zagęszczania osadów.

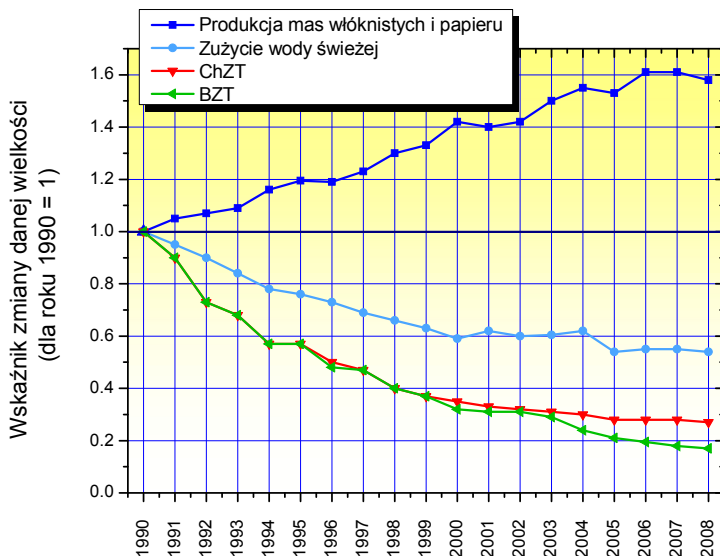
Porównując stosunek wymienionych wyżej kosztów i opłat, można dla każdej wytwórni papieru określić optymalną wartość jednostkowego zużycia wody świeżej, przy której wynikające z tego tytułu całkowite nakłady finansowe będą najniższe (rys. 2.1.2).



Rys. 2.1.2. Zmiany kosztów i opłat wynikających z obniżania jednostkowego zużycia wody świeżej (Przybysz et al., 1994)

Analiza zmian w zużyciu wody świeżej w krajach CEPI wskazuje, że ograniczanie zużycia wody świeżej w papiernictwie staje się coraz trudniejsze. Ilustracją powyższego stwierdzenia może być rys. 2.1.3, na którym przedstawiono względne zmiany w latach 1990-2008 roku podstawowych wskaźników, takich jak produkcja, całkowite zużycie wody świeżej i zanieczyszczenia ścieków w przemyśle celulozowo-papierniczym w krajach stowarzyszonych w CEPI (CEPI Annual Statistics 2010).

Analizując przedstawione krzywe, wyraźnie można zaobserwować ciągły wzrost produkcji oraz znaczne spadki ilości związków ładunku ChZT i BZT w ściekach. Krzywa zużycia wody świeżej po 2000 roku w zasadzie utrzymuje się na tym samym poziomie. Uwzględniając rosnącą produkcję oznacza to, że w omawianym okresie zapotrzebowanie na wodę świeżą cały czas było ograniczane, jednakże już nie w takim stopniu, jak do roku 2000.



Rys. 2.1.3. Zmiany produkcji, zużycia wody świeżej i zanieczyszczenia ścieków w latach 1990-2008 w przemyśle celulozowo-papierniczym w krajach stowarzyszonych w CEPI (CEPI Annual Statistics 2010)

Przy założeniu utrzymania się tendencji wzrostu produkcji można domniemywać, że w przyszłości bezwzględne zapotrzebowanie na wodę świeżą nie będzie się już radykalnie obniżać, a może nawet zacznie wzrastać. Powyższe fakty wskazują na możliwość pojawienia się trudności w dalszym ograniczaniu zużycia wody świeżej. W niniejszej pracy podjęto próbę sprecyzowania tych trudności poprzez analizę równowag cząstkowych składających się na równowagę technologiczną maszyny papierniczej.

W układzie technologicznym papierni, woda stanowi środowisko, w którym ustalają się pozostałe równowagi cząstkowe. *Z tego względu bilans wody i wynikająca z niego równowaga wodna jest czynnikiem zmienianym celowo przez człowieka jako odpowiedź na określone wymagania zewnętrzne. Wskaźnikiem charakteryzującym równowagę wodną w papierni jest, wspomniane już wcześniej, jednostkowe zużycie wody świeżej wyrażane w m^3/t papieru.* Konsekwencją tego faktu są zmiany zachodzące w pozostałych równowagach cząstkowych.

Na podstawie analizy bilansu głównych strumieni wody wprowadzanych i odprowadzanych z układu technologicznego papierni można stwierdzić, że równowagę wodną papierni determinują: suma strumieni wprowadzanej do układu wody świeżej (Q_{ws}) i suma strumieni wody wprowadzanej z półproduktami włóknistymi, innymi surowcami oraz pomocniczymi środkami chemicznymi (Q_{ps}), zaś na wodę odpływającą z układu składają się strumienie wody zawartej w ściekach (Q_{sc}), osadach stałych (Q_o), a także woda odparowana

z układu (Q_{par}) i woda odprowadzana z produktem (Q_{pap}) (Przybysz, 1995). Zatem ogólnie równanie bilansowe (2.1) przyjmie następującą postać:

$$\sum Q_{ws} + \sum Q_{ps} = \sum Q_{pap} + \sum Q_{sc} + \sum Q_o + \sum Q_{par} \quad (2.1)$$

Z przedstawionego równania (2.1) wynika, że jeżeli założy się, że nadrzędnym celem zamknięcia układu wodno-masowego papierni jest wyeliminowanie ścieków ($Q_{sc} = 0$), wówczas łatwo stwierdzić, że ilość wody wprowadzanej do układu musi być zbliżona do sumy ilości wody odparowanej, wody odprowadzanej z papierem oraz z osadami. Przy założeniu, że ilość wody odprowadzanej z papierem i osadami stałymi jest pomijalnie mała ($Q_{pap} \rightarrow 0$ oraz $Q_o \rightarrow 0$), to okazuje się, że nawet w przypadku całkowitego zamknięcia obiegu wodnego zapotrzebowanie na wodę świeżą będzie wciąż niezerowe ze względu na wodę odparowywaną. O tym, ile trzeba odparować wody ze wstęgi papieru, decyduje różnica między wymaganą suchością końcową produktu a suchością początkową wstęgi papierniczej wprowadzanej do sekcji suszącej. Suchość początkowa (przed sekcją suszącą) jest natomiast uzależniona od efektywności odwadniania mechanicznego realizowanego w dwóch pierwszych sekcjach maszyny papierniczej: sekcji formującej i sekcji prasowej. Z racji tego, że w sekcjach tych woda występuje w postaci ciekłej oraz że mają one znaczący wpływ na równowagę wodną papierni, obie te sekcje są często określane wspólnym mianem „części mokrej” maszyny papierniczej.

Aktualne systemy odwadniania wstęgi papieru przed sekcją suszącą umożliwiają uzyskanie suchości ok. 45-55%. Zakładając, że sekcja prasowa odwadnia wstęgę papieru średnio do suchości ok. 45% oznacza to, że na każdą 1 tonę papieru musi być odparowane ok. 1,2 m³ wody. W przypadku stosowania suchych półproduktów włóknistych potrzeba dla praktycznie zupełnego zamknięcia układu wodno-masowego jeszcze ok. 1,5 m³/t wody świeżej na każdą tonę produktu (Holik, 2006). Jest to najniższe, graniczne jednostkowe zapotrzebowanie na wodę świeżą w systemie typu ZLE (Zero Liquid Effluent System).

Jednak w przypadku papierni współpracującej bezpośrednio z wytwórnią mas włóknistych znaczne ilości wody są wykorzystywane jako czynnik transportujący. Zwykle masę włóknistą przesyła się w postaci zawiesiny o stężeniu ok. 2%, a w papierni następuje jej zagęszczanie do stężenia ok. 4%. Zatem z każdą toną półproduktu włóknistego przekazywane jest do papierni ok. 49 m³ wody, a po zagęszczeniu uzyskuje się ok. 25 m³/t wody, która powinna być zawrócona do wytwórni mas włóknistych. Jeżeli rozpatrujemy papiernię jako autonomiczny układ technologiczny, to w tym przypadku praktycznie nie jest możliwe uzyskanie systemu ZLE, bowiem z każdą toną suchej masy włóknistej do układu zostają wprowadzone 24 m³ wody, które zawsze trzeba będzie usunąć w postaci ścieków. W takim przypadku w celu ograniczenia ilości wody wprowadzanej do układu z półproduktami włóknistymi, stosuje się w układach zintegrowanych zamiast zagęszczarek masy – urządzenia odwadniające. Urządzenia te pozwalają na

zwiększenie stężenia surowców włóknistych do 20-40%, co tym samym zmniejsza ilość wprowadzanej do układu wody do ok. 2,5-5 m³ na tonę półproduktu.

W praktyce przemysłowej istotnym ograniczeniem jest fakt, że nie wszędzie można bezpośrednio zastąpić wodę świeżą technologiczną wodą obiegową. Istnieje szereg układów wymagających wody czystej, pozbawionej zawiesiny i o odpowiednich parametrach fizykochemicznych. Należą do nich:

- układy wytwarzające parę technologiczną,
- układy chłodzenia,
- uszczelnienia pomp wirowych i próżniowych,
- wysokociśnieniowe natryski myjące sito,
- natryski pralek filców,
- natryski zwilżające wstęgę papieru.

W przypadku systemu ZLE, praktycznie we wszystkich tych układach woda świeża musi być zastąpiona odpowiednio przygotowaną wodą obiegową. Jest to obecnie możliwe poprzez zastosowanie np. filtracji membranowej. W zależności od wielkości usuwanych cząstek wyróżnia się cztery podstawowe rodzaje tego procesu:

- mikrofiltracja (rzęd wielkości usuwanych cząstek: ok. 0.1-10 μm),
- ultrafiltracja (rzęd wielkości cząstek: ok. 0.01-0.5 μm),
- nanofiltracja (rzęd wielkości cząstek: ok. 0.001-0.01 μm),
- odwrócona osmoza (rzęd wielkości cząstek: < 0.005 μm).

Obecnie, ze względu na wysokie koszty nanofiltracji oraz odwróconej osmozy, w celu uzyskania wody o czystości porównywalnej z wodą świeżą najczęściej stosuje się ultrafiltrację.

W opracowaniach Pohjalainena (2005) można znaleźć informacje, że w przypadku wód z procesu produkcji papieru zastosowanie ultrafiltracji pozwala już całkowicie usunąć rozpuszczone poli- i oligosacharydy, część substancji ligninopochodnych, substancje odpowiedzialne za tzw. mikrosticksy, a także bakterie. Tak oczyszczona woda wykazuje znacznie niższe zapotrzebowanie kationowe i zapotrzebowanie na biocydy. Wadą ultrafiltracji jest jej niewielki wpływ na obniżenie ChZT oraz przewodności właściwej. Niemniej woda oczyszczona w tym procesie może być już stosowana do wysokociśnieniowych natrysków myjących oraz do rozcieńczania chemikaliów.

Pomimo dostępnych, efektywnych metod i technologii oczyszczania wody, wciąż trzeba pamiętać, że zmiana ilości dopływającej wody świeżej do układu technologicznego wiąże się ze zmianą równowagi wodnej w tym układzie. Aby utrzymać ciągłość procesu produkcyjnego, konieczne są więc działania dostosowujące technologię do nowej równowagi wodnej.

2.2. Równowaga masowa

Wody technologiczne krążące w papierni stanowią układ wieloskładnikowy zawierający szereg substancji, których właściwości fizykochemiczne i chemiczne oraz wynikające z tego wzajemne oddziaływania mają istotny wpływ na przebieg procesu produkcyjnego, jakość produktu oraz parametry ścieków usuwanych z układu. Wody te mogą zawierać szereg różnych substancji pochodzących z procesu produkcyjnego, zarówno nierozpuszczalnych, obecnych w postaci zawiesiny, jak i rozpuszczonych. Ilość i rodzaj poszczególnych substancji zależą głównie od rodzaju używanego surowca włóknistego, wody świeżej oraz stosowanych dodatków masowych i pomocniczych środków chemicznych (Hubbe, 2007a-b).

W przypadku analizy równowagi masowej pod kątem jej wpływu na całkowitą równowagę technologiczną omawianego układu należy uwzględnić fakt, że nierozpuszczalne substancje stałe zawarte w wodzie obiegowej podlegają innym zasadom rozdziału oraz inaczej wpływają na proces produkcyjny niż substancje rozpuszczone. Substancje stałe mają przede wszystkim znaczący i bezpośredni wpływ na zdolność do odwadniania formowanej i prasowanej wstęgi papierniczej, na zdolność ruchową i wydajność maszyny papierniczej oraz bezpośrednio oddziałują na właściwości gotowego produktu (Steenberg, Sandgren, Wahren, 1960, Szwarcstajń i Przybysz, 1972, 1976, 1997, Wearing et al., 1985, Waterhouse i Omori, 1993). Nie wpływają (względnie ich wpływ jest bardzo ograniczony i nie ma znaczenia technologicznego) na właściwości fizykochemiczne wody obiegowej (Banerjee et al., 2009, Szwarcstajń, 1983, Wook-Yeon et al., 2005).

Decydującym czynnikiem, który kształtuje równowagę masową w maszynie papierniczej, są obecne w układzie technologicznym nierozpuszczalne substancje stałe. Za wskaźnik, który charakteryzuje tę równowagę przyjęto stężenie zawiesiny w I wodzie podsitowej wyrażone w mg/dm^3 .

Substancje rozpuszczone, jako odpowiedzialne za właściwości fizykochemiczne wód krążących w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej, można przypisać do równowagi fizykochemicznej.

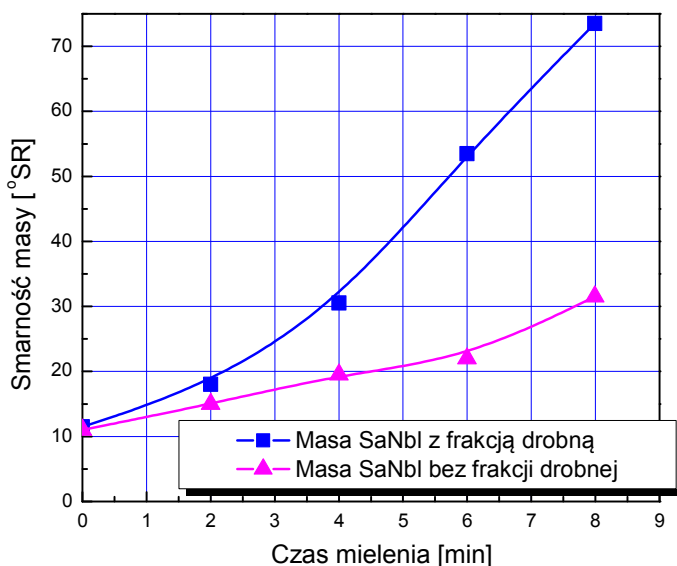
Badania Steenberga, Sandgrena i Wahrena (1960), Przybysza i Szwarcstajńa (1973), Kosonena et al. (2002), Backstroma et al. (2008) i wielu innych badaczy wykazały, że w skład zawiesiny zawartej w wodzie obiegowej maszyny papierniczej wchodzi niewielkie ilości krótkich włókien, cząstki wypełniacza (o ile jest stosowany) i przede wszystkim cząstki frakcji drobnej, stanowiące główną masę tej zawiesiny. Substancje te przenikają do wód obiegowych w trakcie procesu formowania i odwadniania wstęgi papieru w sekcji formującej maszyny papierniczej.

Szczególne znaczenie ma frakcja drobna, która w decydującym stopniu jest odpowiedzialna za wymienione wcześniej oddziaływania na proces technologiczny (Przybysz i Szwarcstajń, 1973, Hen et al., 2009) i temu składnikowi w niniejszej pracy poświęcone jest najwięcej uwagi.

Frakcja drobna (ang. fines fraction), zwana dawniej kryllem, została wyodrębniona przez Steenberga, Sandgrena i Wahrena (1960) jako oddzielny składnik masy papierniczej z uwagi na jej właściwości odmienne od frakcji włóknistej. Badania zapoczątkowane przez Sandgrena i Wahrena (1960), a następnie prowadzone m.in. przez Przybysza i Szwarcsztajna (1972-1976), Mancebo i Krokoskę (1985), Retulainena et al. (1993) oraz Liimatainena (2009) wykazały, że frakcja drobna charakteryzuje się m. in. bardzo rozwiniętą powierzchnią zewnętrzną, bardzo słabą odwadnialnością oraz wysokim stopniem spęcznienia (tabela 2.1). Czynniki te powodują, że ma ona duży wpływ negatywny na wspomnianą już zdolność odwadniania masy papierniczej (Przybysz i Szwarcsztajn, 1972-1977, Łazuchiewicz, 2005, Kang i Paulapuro 2006, Cole et al., 2008), co przedstawiono na rys. 2.2.1.

Tabela 2.1. Wybrane właściwości cząstek stałych zawartych w technologicznej wodzie obiegowej (Pruszyński, 2006)

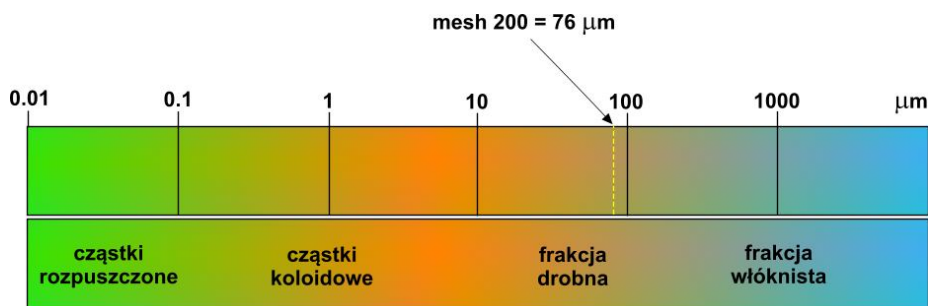
Substancja	Rozmiar cząstek [μm]	Jednostkowe pole powierzchni [m ² /g]	Stopień spęcznienia [%]
Włókna celulozowe	35-35000	1-2	90-180
Frakcja drobna	1-75	8-20	260-410
TiO ₂ (wypełniacz)	0.25-0.50	10-20	–
CaCO ₃ strącany (wypełniacz)	0.2-1	6-10	–



Rys. 2.2.1. Wpływ frakcji drobnej na zdolność do odwadniania (mierzonej za pomocą wskaźnika smarności) masy papierniczej SaNbl mielonej w młynku PFI (Przybysz i Szwarcsztajn, 1972)

Z rysunku 2.2.1 wynika, że po usunięciu frakcji drobnej z mielonej masy papierniczej jej zdolność do odwadniania rośnie, co jest konsekwencją niższych wartości wskaźnika smarności.

Badania nad frakcją drobną kontynuowane przez Britta et al. (1973, 1976, 1986) doprowadziły do uściślenia definicji frakcji drobnej, za którą obecnie uważa się wszystkie cząstki pochodzenia włóknistego o rozmiarach mniejszych niż 76 μm (rys. 2.2.2). Wymiar ten stał się jednocześnie dolną granicą długości włókien celulozowych. Jest to granica umowna, bowiem w rzeczywistości papiernicza masa włóknista jest zawiesiną złożoną z cząstek o praktycznie wszystkich wymiarach z zakresu od kilku milimetrów do rozmiaru poniżej 0.1 μm odpowiadającemu już substancjom koloidalnym i rozpuszczonym. Dlatego też wyznaczenie sztywnej granicy pomiędzy frakcją włóknistą a frakcją drobną jest uproszczeniem, które należy traktować wyłącznie jako technologicznie użyteczny kompromis.



Rys. 2.2.2. Zakres wymiarów różnego rodzaju cząstek masy papierniczej

Frakcję drobną klasyfikuje się dodatkowo ze względu na jej pochodzenie (Przybysz i Szwarcsztajn, 1973, Davison, 1992). Obecnie uznaje się dwa rodzaje frakcji drobnej:

- ***pierwotna frakcja drobna*** jako naturalny składnik każdej niemielonej masy włóknistej – w masach pierwotnych są to głównie fragmenty uszkodzonych włókien,
- ***wtórna frakcja drobna*** powstająca na skutek mechanicznej obróbki celulozowej masy włóknistej w środowisku wodnym.

Na wtórną frakcję drobną składają się drobne cząstki oderwanych, zewnętrznych warstw błony komórkowej. W odróżnieniu od pierwotnej frakcji drobnej, frakcja wtórna ma duże znaczenie użytkowe. Przybysz i Szwarcsztajn (1972-76), Mancebo i Krokoska (1985), Abubakr (1994) oraz Waterhouse i Omori (1993) udowodnili, że wtórna frakcja drobna wydzielająca się w trakcie mielenia włókien celulozowych wpływa pozytywnie na właściwości papieru. Z drugiej strony również Przybysz i Szwarcsztajn (1972-76), a później m.in.

Cole et al. (2008) wykazali, że frakcja ta znacznie bardziej obniża zdolność do odwadniania masy papierniczej.

Uwzględniając powyższe fakty można stwierdzić, że na równowagę masową opisującą stan stałych składników obecnych w układzie wodno-masowym papirni składają się przede wszystkim strumienie półproduktów włóknistych wraz z ewentualnymi zanieczyszczeniami oraz strumienie pozostałych surowców (np. stałych dodatków masowych). Zakładając, że papirnia pracuje już przez czas wystarczający, aby w układzie technologicznym została osiągnięta równowaga technologiczna, to w układzie tym będzie już pewna ilość cząstek stałych. Wielkość tę można scharakteryzować za pomocą objętości układu (V_r) i średniego stężenia w tym układzie wyrażonego za pomocą ułamka masowego x_r . W zależności od zmian zachodzących w równowadze technologicznej, ilość tego materiału może się zmniejszać lub zwiększać.

W procesie produkcji papieru większa część stałych składników masy papierniczej (włókien oraz frakcji drobnej) zostaje zatrzymana na sicie maszyny papierniczej w postaci formującej się wstęgi papierniczej i jest odprowadzana z układu jako produkt końcowy (papier). Część najkrótszych włókien oraz frakcja drobna, która przeniknęła przez sito z wodami odciekowymi tworzy w tych wodach zawiesinę powiększając wartość x_r . Następnie w wyniku wtórnego rozdziału część zawiesiny z wody obiegowej jest ponownie wprowadzana do papieru, część krąży w wodzie obiegowej, część zaś zostaje odprowadzana z układu ze ściekami i osadami. Bilans ten można ogólnie wyrazić za pomocą równania (2.2):

$$\sum_{i=1}^n (Q_{ps} x_{ps(n)}) + V_r x_r = \sum_{i=1}^n (Q_{pap} x_{pap(n)}) + \sum_{i=1}^n (Q_o x_{o(n)}) + \sum_{i=1}^n (Q_{sc} x_{sc(n)}) \quad (2.2)$$

Jednym z najistotniejszych czynników decydujących o stanie równowagi masowej w układzie technologicznym maszyny papierniczej jest rozdział frakcji drobnej w wodzie obiegowej w procesie formowania wstęgi na sicie maszyny papierniczej. Wskaźnikami, które opisują stopień zatrzymania (a tym samym rozdziału) masy w maszynie papierniczej (rys. 2.2.3) są:

- retencja pierwszego przejścia wyrażająca ilość cząstek stałych zatrzymanych na sicie maszyny papierniczej w części rejestrowej formera:

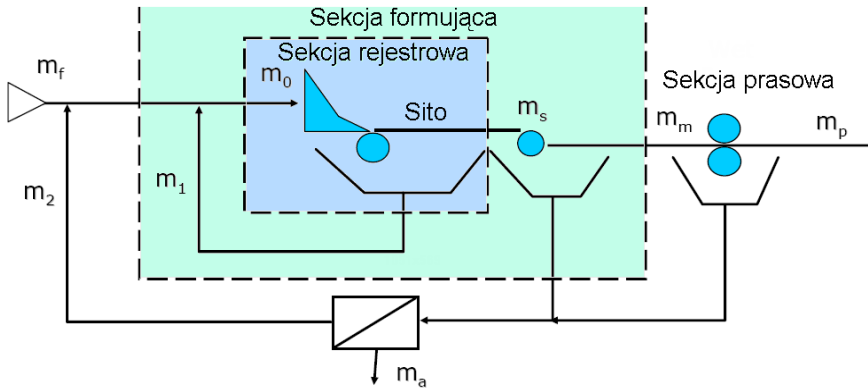
$$R_{fp} = \frac{x_H - x_T}{x_H} * 100, [\%] \quad (2.3)$$

- retencja na sicie formera ujmująca liczbowo całkowitą ilość cząstek stałych zatrzymanych na sicie w sekcji formującej maszyny papierniczej:

$$R_{wire} = \frac{m_m}{m_0 - m_1} * 100, [\%] \quad (2.4)$$

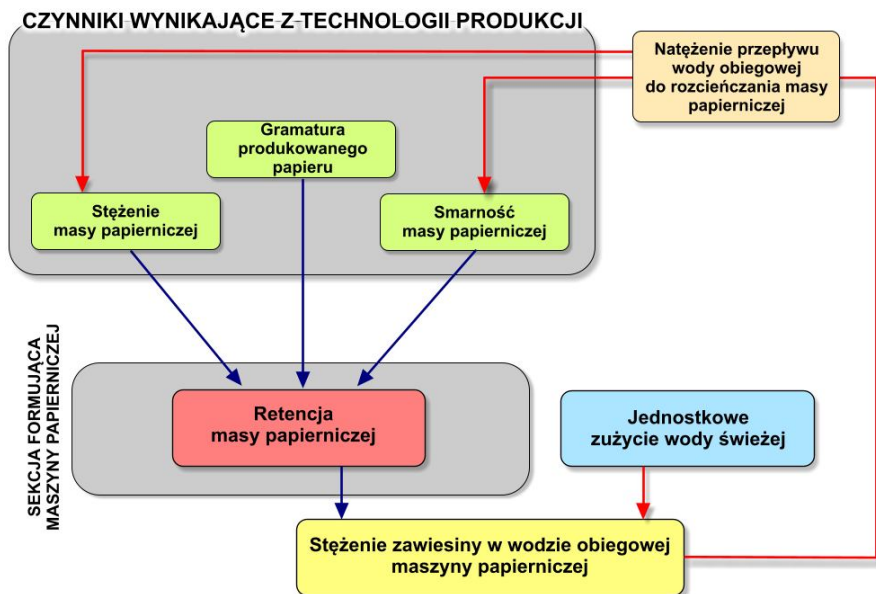
- retencja systemu przedstawiająca całkowitą ilość substancji stałych, które w postaci wstęgi papierniczej opuszczają sekcję „mokrą” maszyny papierniczej:

$$R_s = \frac{m_p}{m_f} * 100, [\%] \quad (2.5)$$



Rys. 2.2.3. Poglądowy schemat rozdziału strumieni w sekcji formującej maszyny papierniczej (Pruszyński, 2006)

Oczywiście wszystkie te wskaźniki są ze sobą powiązane i nigdy nie osiągną wartości 100%. Retencja mniejsza niż 100% wskazuje, że część masy krąży w układzie technologicznym papierni. Oznacza to również, że tuż po uruchomieniu procesu produkcyjnego bilans wodno-masowy omawianego układu technologicznego zmienia się w sposób ciągły i konieczny jest pewien okres czasu do ustalenia się równowagi technologicznej. Natomiast po ustabilizowaniu się w układzie wodno-masowym określonego stanu równowagi dynamicznej ustala się również na określonym poziomie zawartość zawiesiny w wodzie obiegowej (m_1). Stężenie zawiesiny w wodzie obiegowej w ustalonych warunkach pracy maszyny papierniczej określa stan równowagi masowej układu technologicznego papierni. Zmiany tego stężenia uzależnione są od szeregu czynników technologicznych (rys. 2.2.4).



Rys. 2.2.4. Najważniejsze czynniki wpływające na stężenie zawiesiny w wodzie obiegowej maszyny papierniczej

Dodatkową trudnością jest fakt, że niektóre z tych czynników są wzajemnie sprzężone. Przykładowo: jednym z czynników decydujących o rozdziale substancji stałych na sicie maszyny papierniczej jest stężenie i zawartość frakcji drobnej w masie papierniczej. Wyższa zawartość frakcji drobnej powoduje obniżenie retencji i zwiększenie ilości zawiesiny w wodzie podsitowej. Następnie woda ta jest wykorzystywana do rozcieńczania kolejnej porcji masy papierniczej, co skutkuje dalszym wzrostem stężenia frakcji drobnej w tej masie i ponownie wpływa na retencję. Takich sprzężeń pomiędzy poszczególnymi parametrami jest bardzo wiele.

Ogólnie można więc stwierdzić, że każda zmiana stężenia wody obiegowej oznacza zmianę stanu równowagi masowej i tym samym całej równowagi technologicznej. Z tego powodu znajomość rozdziału cząstek stałych masy papierniczej na sicie formera jest kluczowym zagadnieniem pozwalającym określić ilość zawiesiny krążącej w wodzie obiegowej i tym samym stan równowagi technologicznej w całej papirni.

2.3. Równowaga fizykochemiczna

Proces wytwarzania papieru jest ściśle związany z koniecznością utrzymania określonych parametrów fizykochemicznych panujących w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej. Jest to bowiem warunek konieczny do uzyskania i utrzymania właściwego współdziałania surowców włóknistych

z pozostałymi składnikami masy papierniczej (wypełniaczami, środkami zaklejającymi, pigmentami itp.), a także zachowania odpowiedniej stabilności pracy całego ciągu technologicznego (Przybysz, 1995). Przykładowo: produkcja papieru z udziałem węgla wapnia jako wypełniacza jest możliwa tylko przy pH neutralnym. Stosowanie enzymów w celu obniżenia zużycia energii mielenia i zmniejszenia ilości wydzielającej się frakcji drobnej również wymaga neutralnego pH, natomiast przy operacji zaklejania z udziałem żywic zwykle konieczne jest środowisko kwaśne (pH ok. 4,5-5,5). Z kolei papiery z dużą zawartością wypełniacza wymagają często utrzymywania potencjału elektrokinetycznego w masie papierniczej blisko punktu izoelektrycznego (Przybysz et al., 1994, Thorn et al., 2009).

Na stan fizykochemiczny wód krążących w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej mają wpływ przede wszystkim substancje, które są rozpuszczone w tych wodach. Z jednej strony należą do nich wszystkie te związki, które muszą być celowo dodane w celu zapewnienia właściwego przebiegu produkcji. Są to substancje pożądane. Z drugiej strony istnieje szereg substancji, które są wprowadzane nieświadomie (np. w postaci zanieczyszczeń stosowanych surowców) i stanowią potencjalne zagrożenie dla procesu technologicznego (Brun et al., 2007). Zwykle po przekroczeniu określonego stężenia substancje te mogą wchodzić w różne interakcje z cząstkami surowców włóknistych, dodatków masowych i pomocniczych środków chemicznych, wywołując zaburzenia w procesie. Głównymi źródłami pochodzenia tych substancji są strumienie:

- półproduktów włóknistych,
- dodatków masowych,
- pomocniczych środków chemicznych,
- wody świeżej.

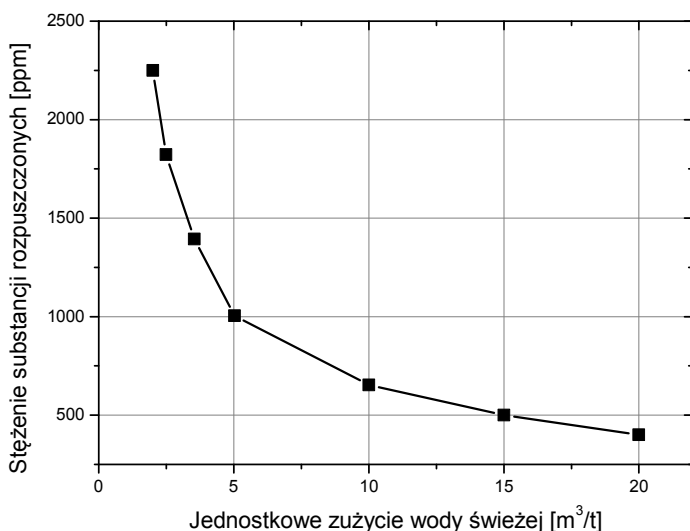
Z półproduktów włóknistych mogą się np. wydzielić związki ligninopochodne, substancje ekstrakcyjne, hemicelulozy, pozostałości ługów warzelnych i związków bielących. W przypadku stosowania makulatury trzeba się ponadto liczyć z wieloma innymi rodzajami zanieczyszczeń, często trudnych do jednoznacznego sklasyfikowania. Wszelkie dodatki masowe i pomocnicze środki chemiczne mogą być źródłami nieorganicznych związków fosforu, glinu, wapnia, chloru, siarki, krzemu, a także różnego rodzaju związków organicznych. Również woda świeża zawiera pewną ilość rozpuszczonych soli mineralnych (związki wapnia, magnezu, sole sodowe, siarczany, chlorki, krzemiany), a nierzadko również i kwasy humusowe. Ponadto potencjalnym źródłem rozpuszczalnych zanieczyszczeń (np. związków żelaza) przenikających do wód technologicznych mogą być stare, zaniedbane lub skorodowane instalacje technologiczne (Lacorte, 2003, Hubbe, 2007a-b, Brun et al., 2007). Dodatkowo mogą istnieć wtórne źródła substancji rozpuszczonych np. w wyniku rozwoju i obumierania mikroorganizmów występujących w układzie technologicznym.

Poziom stężenia substancji rozpuszczonych w wodzie obiegowej w ustalonych warunkach pracy maszyny papierniczej determinuje stan równowagi fizykochemicznej tego układu.

Równowaga fizykochemiczna może być rozpatrywana zarówno w aspekcie analizy skutków współdziałania innych równowag cząstkowych, jak również jako czynnik kontrolowany przez człowieka (np. podczas dozowania pomocniczych środków chemicznych), który jest przyczyną zmian pozostałych równowag cząstkowych.

Równowaga fizykochemiczna może być traktowana jako część równowagi masowej, jednakże charakteryzuje wyłącznie stan równowagi substancji rozpuszczonych w wodzie obiegowej, które podlegają innym prawom rozdziału niż substancje nierozpuszczalne. Substancje rozpuszczalne mogą bez przeszkód krążyć w układach cyrkulacyjnych i podlegają głównie prawom rozpuszczalności, sorpcji i desorpcji. Ich bilans w układzie technologicznym papierni można również wyrazić za pomocą ogólnego równania 2.2, jednak przy założeniu, że uwzględnia się tylko substancje rozpuszczalne.

Problem ilości substancji rozpuszczonych stał się szczególnie istotny w przemyśle papierniczym od chwili, kiedy zaczęto ograniczać jednostkowe zużycie wody świeżej. W wyniku wielokrotnego zawracania i wykorzystywania tej samej wody produkcyjnej stężenie tych substancji zaczęło niebezpiecznie wzrastać i powodować problemy produkcyjne. Co najważniejsze, zmiany te nie przebiegają liniowo wraz z malejącym dodatkiem wody świeżej. Dane literaturowe wskazują (rys. 2.3.1), że największy przyrost stężenia substancji niepożądanych obserwuje się przy zużyciu wody świeżej poniżej 5-7 m³/t produktu (Möbius, 2006).



Rys. 2.3.1. Przykład wpływu zmniejszenia zużycia wody świeżej na ilość substancji rozpuszczonych w wodach technologicznych papierni (Möbius, 2006)

Wynikająca z tego zmiana równowagi technologicznej ma bezpośredni wpływ zarówno na sposób prowadzenia procesu produkcyjnego, na gospodarkę wodną, jak również na jakość ścieków odprowadzanych z zakładu. Między innymi Volkov et al. (1974a, 1974b), Ek et al. (2009), Przybysz et al. (1994) oraz Thorn et al. (2009) wskazują, że efektem nadmiaru substancji rozpuszczonych mogą być:

- zmiany pH w układzie,
- zmniejszenie retencji masy na sicie maszyny papierniczej,
- wzrost korozyjności i zmniejszenie trwałości armatury i urządzeń,
- wytrącanie się osadów,
- pienienie się masy papierniczej,
- zwiększenie szybkości rozwoju mikroorganizmów w układzie technologicznym,
- zagrożenia dla obsługi (pojawienie się właściwości drażniących wód obiegowych, które nawet przy neutralnym pH, mogą stanowić zagrożenie dla oczu i skóry),
- negatywnego oddziaływania na dalsze procesy oczyszczania wód obiegowych,
- obniżenie efektywności działania pomocniczych środków chemicznych,
- pogorszenie jakości produktu (spadek białości, właściwości wytrzymałościowych, pojawienie się plam, dziur, niejednorodności mikro- i makrostrukturalnych itp.).

Najpoważniejszym skutkiem, wynikającym z wystąpienia wyżej wymienionych zjawisk, może być destabilizacja całego procesu produkcyjnego.

Dodatkową trudnością jest fakt, że w zasadzie każda papiernia ma swoją unikalną tzw. „chemię” wynikającą m.in. z rodzaju i źródła pochodzenia stosowanych surowców, stosowanych dodatków masowych czy pomocniczych środków chemicznych. Konsekwencją tego jest brak możliwości ścisłego i jednoznacznego określenia rodzaju substancji, które występują w danym układzie technologicznym. Z drugiej strony, sama znajomość np. ogólnej ilości substancji rozpuszczonych w wodach technologicznych jest zwykle niewystarczająca, gdyż ich wpływ na przebieg procesu produkcyjnego zależy zarówno od ilości, jak i od rodzaju substancji rozpuszczonej. Ponieważ jednak oznaczanie składu substancji rozpuszczonych jest dość złożone, zwykle określa się bezpośrednio ich wpływ na poszczególne wskaźniki jakości wody. Do tych wskaźników należą: pH, przewodność właściwa, ChZT, potencjał elektrokinetyczny, zapotrzebowanie jonowe, potencjał redox itp. W celu utrzymania równowagi fizykochemicznej w układzie wskaźniki te muszą być utrzymywane na ściśle określonym poziomie.

Przeprowadzone badania własne (tabela 2.2) wykazały, że w polskich wytwórniach papieru stężenie ogółu substancji rozpuszczonych zwykle przekracza

wartość 1500 mg/dm³, pomimo iż deklarowane jednostkowe zużycie wody świeżej było nieco wyższe niż wynikałoby to z rys. 2.3.1. W niektórych przypadkach stężenie substancji rozpuszczonych było większe niż stężenie zawiesiny. We wszystkich badanych układach technologicznych sygnalizowano występowanie niektórych z wymienionych wyżej trudności.

Tabela 2.2. Porównanie zawartości substancji stałych i rozpuszczalnych w wodach obiegowych wybranych maszyn papierniczych (badania własne)

Stężenie substancji rozpuszczonych (DS) w I wodzie podsitowej [mg/dm ³]	Stosunek ilości substancji rozpuszczonych do substancji stałych w I wodzie podsitowej (DS/SS)
1830	0,70
1940	0,80
1700	0,40
1500	0,75
1670	0,85
1530	0,45
1850	3,05
2330	1,50
1410	1,40
1390	1,30
1420	0,60
1660	1,85
1880	0,70
1430	1,45
2110	0,90

Porównanie wyników własnych z danymi zawartymi w literaturze z tego zakresu (Lacorte et al., 2003, Möbius 2006, Pokhrel & Viraraghavan, 2004) wskazuje, że uzyskane wyniki są porównywalne z wielkościami występującymi w papierniach zagranicznych.

W celu utrzymania właściwego poziomu równowagi fizykochemicznej konieczne jest więc neutralizowanie skutków obecności substancji rozpuszczonych lub – jeszcze lepiej – sukcesywne ich usuwanie z obiegu wodno-masowego papierni. Możliwe są dwa rozwiązania: stworzenie warunków umożliwiających odprowadzanie wymaganej ilości tych substancji z wytwarzanym papierem lub usuwanie ich bezpośrednio z wody obiegowej (Przybysz, 1995). Pierwsze rozwiązanie jest niestety bardzo trudnym przedsięwzięciem, wymaga bowiem stworzenia warunków, które pozwalają na zwiększenie stopnia zatrzymania substancji rozpuszczonych w formowanej wstędze papieru. Efektywne i tanie przepro-

wadzenie tej operacji jest obecnie mało prawdopodobne, o czym świadczy brak wartościowych doniesień na ten temat w literaturze naukowej.

W chwili obecnej coraz częściej stosuje się drugą opcję czyli fizyczne, fizykochemiczne lub biochemiczne wydzielanie substancji rozpuszczonych bezpośrednio z wody obiegu. W tym celu wykorzystuje się głównie wspomnianą już filtrację membranową (Pohjalainen, 2005) i aerobowe oraz anaerobowe oczyszczanie biologiczne (Elliott i Mahmood, 2007, Huhtamaki, 2003, Tenno i Paulapuro, 1999).

Warto wspomnieć, że problem akumulacji substancji rozpuszczalnych w wodach technologicznych papierni był i jest z racji swego znaczenia przedmiotem badań wielu naukowców. Przegląd literatury wskazuje, że istnieje stosunkowo dużo doniesień dotyczących rodzaju substancji uwalnianych z mas włóknistych (Brun et al., 2007, Hubbe, 2007). Można też znaleźć informacje dotyczące wpływu substancji wydzielających się z mas włóknistych na jakość produkowanego papieru (Xu et al. 2004, Zhang et al., 1999). Najwięcej publikacji dotyczy samego problemu akumulacji ogółu substancji rozpuszczalnych w układzie technologicznym (Banerjee et al., 2009, Mittal et al., 2006, Miranda et al., 2009).

Rozważając bilans materiałowy substancji rozpuszczonych pod kątem budowy matematycznego modelu równowagi fizykochemicznej wydaje się, że najbardziej istotna jest znajomość ilości substancji rezydujących w strumieniach surowców wprowadzanych do procesu oraz szybkość ich uwalniania z tych surowców. W publikacjach naukowych trudno jednak znaleźć te informacje. W przypadku ilości substancji rezydujących w masach papierniczych jest to zrozumiałe, bowiem zwykle jest to rzecz bardzo indywidualna, uzależniona od wielu czynników, takich jak np. rodzaju i pochodzenia danej masy włóknistej, dokładności jej wymycia itd.

Jeżeli chodzi o badania nad szybkością uwalniania się substancji rozpuszczalnych rezydujących w masach włóknistych, co jest istotne w przypadku tworzenia dynamicznego bilansu tych substancji, najczęściej proces ten był rozpatrywany w aspekcie badań nad uwalnianiem się ściśle określonych grup jonów bądź związków, które zostały wcześniej celowo zaadsorbowane na włóknach. Często są to np. różnego rodzaju polimery wchodzące w skład substancji pomocniczych dla papiernictwa (Granhölm et al., 2009). Ze względu na powyższe fakty wykonano w ramach niniejszej pracy m.in. badania dotyczące szybkości uwalniania się substancji rozpuszczalnych z surowców włóknistych. Wyniki tych badań są przedstawione w rozdziale 3. Przeprowadzone badania pozwoliły jednocześnie wyznaczyć graniczne wartości ilości substancji rozpuszczonych rezydujących w badanych masach włóknistych. Wartości te były wykorzystane jako granice w budowanym modelu.

2.4. Równowaga mikrobiologiczna

Masa włóknista jest medium pochodzenia organicznego, a główną grupą związków wchodzących w skład włókien roślinnych są polisacharydy. Jest to jedna z największych zalet tego surowca, ponieważ jest on w pełni biodegradowalny. Negatywną konsekwencją tego faktu jest duża podatność surowca na różnego rodzaju zakażenia mikrobiologiczne, ułatwione dodatkowo przez fizyczną strukturę włókien celulozowych, znaczny stopień rozdrobnienia cząstek frakcji drobnej, środowisko wodne oraz podwyższoną temperaturę. Mikroorganizmy, które rozwijają się na podłożu zawierającym związki lignocelulozowe określane są mianem mikroorganizmów lignocelulolitycznych (Baldrian et al., 2005). Należą do nich bakterie, grzyby, drożdże i glony (Malherbe, 2003).

W warunkach przemysłowych rozwój tych organizmów jest nieodłączną częścią procesu technologicznego, przy czym warunki fizykochemiczne panujące w układzie technologicznym determinują rodzaj i wielkość populacji danych mikroorganizmów (Gudlauski, 1996, Kanto Öqvist, 2008). Ponieważ mikroorganizmy te mogą oddziaływać na przebieg procesu, ich obecność nie może być pomijana. Można więc mówić o pewnej równowadze mikrobiologicznej, która jest odzwierciedlona stanem rozwoju tych mikroorganizmów w wodzie obieguj wyrażanym np. za pomocą ich ilości przypadającej na jednostkę objętości.

Kanto Öqvist (2008) wskazuje, że źródłami mikroorganizmów w układzie wodno-masowym papierni mogą być:

- woda świeża (N_{ws}),
- półprodukty włókniste (N_{ps}),
- powietrze (N_p).

W sprzyjających warunkach po zakażeniu następuje dalszy, samorzutny rozwój mikroorganizmów w wodzie obieguj. Część mikroorganizmów, podobnie jak inne składniki stałe, usuwana jest z układu technologicznego wraz z papierem (N_{pap}), osadami (N_o) i ściekami (N_{sc}). Ogólny bilans mikrobiologiczny układu wodno-masowego papierni zaproponowany przez Przybysza (1995) i wyrażony jako zmiana ilości mikroorganizmów w tym układzie można przedstawić wzorem (2.6):

$$\frac{dN_M}{dt} = \sum N_p + \sum N_{ws} + \sum N_{ps} + \sum N_r - \sum N_{ob} - \sum N_{pap} - \sum N_{sc} - \sum N_o, \quad (2.6)$$

W rzeczywistości jest to równanie uproszczone, nie uwzględniające w pełni złożonych procesów zmiany masy poszczególnych rodzajów mikroorganizmów na skutek ich rozwoju (N_r) i obumierania (N_{ob}). Procesy te charakteryzują się określoną kinetyką zależną od warunków panujących w danym środowisku i rodzaju mikroorganizmów tam się rozwijających (Selecki i Gradoń, 1985).

W warunkach przemysłowych stosuje się szereg różnych sposobów pozwalających na określenie stopnia rozwoju mikroorganizmów. Thorn et al. (2009) wyróżnili cztery podstawowe grupy metod pomiaru aktywności mikrobiologicznej:

- fizyczne,
- analityczne,
- biologiczne,
- genetyczne.

Metody fizyczne polegają na pośrednim, jakościowym oznaczaniu aktywności mikrobiologicznej. Popularną metodą jest zastosowanie tzw. standardowej powierzchni osadczącej (ang. slime board). Element ten (płytką z tworzywa sztucznego bądź metalu) jest umieszczany w wybranym, możliwie reprezentatywnym miejscu w układzie wodno-masowym papierni. Wizualnie oceniana szybkość zarastania elementu osadczego (narastania błony mikrobiologicznej) jest miarą aktywności biologicznej w badanym układzie.

W metodach analitycznych wykorzystuje się pomiar szybkości określonych reakcji chemicznych, które mogą odzwierciedlać rozwój mikroorganizmów. Do popularnie stosowanych należą: Resazurin Test (kolorymetryczny pomiar potencjału redox), Ninhydrin Test (kolorymetryczny pomiar obecności kwasów aminowych, peptydowych i białek), pomiary stężenia lotnych kwasów tłuszczowych (VFA), ocena zmian stężenia tlenu w wodzie czy monitorowanie pH.

Pomiary biologiczne należą do metod bezpośrednich. Polegają na badaniach mikroskopowych wzrostu laboratoryjnych hodowli kultur mikroorganizmów pozyskanych z próbek pobranych z układu technologicznego. Pozwalają określić zarówno liczbę, jak i rodzaj mikroorganizmów.

Popularność metod genetycznych rośnie wraz z udoskonalaniem technik pomiarowych. Obecnie do najpopularniejszych należą: testy z wykorzystaniem reakcji polimerazy (Polymerase Chain Reaction – PCR), znakowanie immunofluorescencyjne czy oznaczanie obecności materiału genetycznego poprzez tzw. FISH test (Fluorescence In Situ Hybridization). Oczywiście najlepsze efekty przynosi połączenie kilku metod, co jest najczęściej praktykowane (Hilbert et al., 2001).

Z technologicznego punktu widzenia stan równowagi mikrobiologicznej można ogólnie zdefiniować jako całkowitą ilość życia biologicznego w jednostce objętości cyrkulujących wód technologicznych. Zawartość mikroorganizmów w wodzie obiegowej uzależniona jest od wielu czynników. Należą do nich przede wszystkim czynniki fizykochemiczne: temperatura wody, zawartość i rodzaj substancji w niej rozpuszczonych, rodzaj i ilość zawiesiny, pH czy zawartość powietrza w wodzie (Sanborn, 1965, Thorn et al., 2009). Oprócz czynników fizykochemicznych, istotną rolę odgrywa sama budowa i praca układu technologicznego: użyte materiały konstrukcyjne, ilość i wielkość kadzi i zbiorników buforowych (i związany z nimi czas przebywania surowca), natężenie przepły-

wu poszczególnych strumieni i stosowane operacje jednostkowe (Appling et al., 1955).

Sanborn (1965), Bowers (1977), Jung i Kutzner (1978), a także Blanco et al. (1996) oraz wielu innych badaczy stwierdziło, że nadmierny rozwój mikroorganizmów może powodować następujące problemy w papierni:

- powstawanie osadów i śluzów,
- przykre zapachy i odory,
- biochemiczną korozję armatury i urządzeń,
- problemy z formowaniem i odwadnianiem wstęgi papierniczej,
- trudności z utrzymaniem ciągłości ruchowej maszyny papierniczej (zrywy wstęgi),
- zagrożenie bezpieczeństwa pracy,
- obniżenie jakości produktu (powstawanie plam i dziur w papierze).

Problem rozwoju mikroorganizmów w układzie wodno-masowym papierni jest bardzo skomplikowanym zagadnieniem, w którym występuje wiele oddzielnych problemów. Tematem tym zajmowało się i zajmuje wielu naukowców.

Kanto Öqvist (2008) wykazała w swych badaniach, że wraz ze zmniejszającym się udziałem wody świeżej w procesie wytwarzania papieru wzrasta ilość mikroorganizmów w układzie technologicznym, przy czym jednocześnie następuje zmiana rodzaju rozwijających się bakterii. Rosnąca temperatura powoduje rozwój bakterii ekstremofilnych. Badaczka stwierdziła ponadto, że w większości przebadanych zamkniętych obiegów wodnych przeważały bakterie gram-dodatnie.

Badania z zakresu mikrobiologii papieru były przedmiotem pracy doktorskiej (Miller, 1998) zrealizowanej w Instytucie Papiernictwa i Poligrafii PŁ. Skupiono się w niej głównie na wpływie różnych czynników technologicznych na stopień skażenia gotowych produktów przeznaczonych na opakowania do produktów spożywczych. Na podstawie uzyskanych wyników autorka wskazała m.in. na problem zakażeń wtórnych, występujących np. pomimo suszenia papieru w temperaturach przekraczających 110°C przez kilkadziesiąt sekund.

Kontrola równowagi mikrobiologicznej jest trudna. W celu wyeliminowania bądź możliwie maksymalnego ograniczenia zakłóceń spowodowanych zakażeniami mikrobiologicznymi, podejmowane są różnego typu działania. Ogólnie można je zakwalifikować do metod fizycznych, fizykochemicznych i chemicznych (Blanco et al., 1996, Miller, 1998). Metody fizyczne polegają na utrzymaniu układu w czystości, likwidacji martwych stref, w których może następować rozwój mikroorganizmów, zmianie okładzin wewnętrznych powierzchni zbiorników i kadzi na gładkie, glazurowane płytki. W najnowszych instalacjach dąży się do zmniejszenia objętości układu wodno-masowego maszyny papierniczej i zwiększenia natężeń przepływów strumieni cyrkulacyjnych (Meinander, 2003, Jung, Kappen, 2001), co przeciwdziała osadzaniu się filmu biologicznego wewnątrz układu.

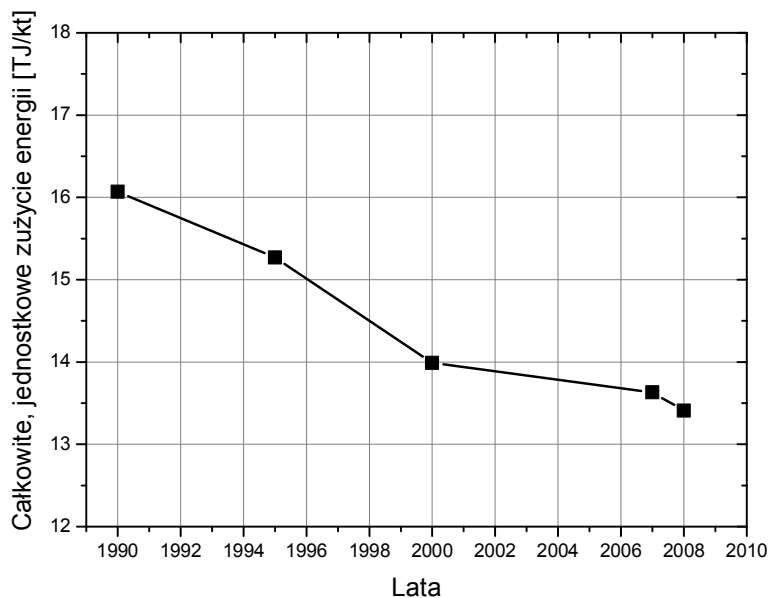
Metody fizykochemiczne to kontrola pH, temperatury oraz stosowanie napowietrzania wód produkcyjnych. Natomiast metody chemiczne polegają na stosowaniu środków bakteriostatycznych, tzw. biocydów (Miller, 1998, Chaudhary et al., 1997, Thorn et al., 2009).

Ze względu na złożoność tego zagadnienia, badania dotyczące równowagi mikrobiologicznej przekraczały zakres prac wykonanych w ramach niniejszego opracowania.

2.5. Równowaga energetyczna

Przemysł papierniczy należy do bardzo energochłonnych. Przykładowo, przeciętna europejska papiernia zużywa ok. 2-4 MWh energii w przeliczeniu na 1 tonę produktu (Klepaczka, 2010), przy czym zużycie to jest silnie uzależnione od rodzaju produkowanego asortymentu. Niektóre rodzaje papieru (np. tissue) wymagają do 7 MWh/t energii, a przy produkcji papierów specjalnych (np. fotograficznych) zużycie energii może sięgać nawet 20 MWh/t (Austin, 2010).

Okolo 60% energii w przemyśle papierniczym jest dostarczane w postaci pary grzejnej, a pozostała część w postaci energii elektrycznej (Francis et al., 2002, Klepaczka, 2010). Pomimo obserwowanego, corocznego spadku zapotrzebowania na energię (rys. 2.5.1 – na przykładzie krajów należących do CEPI), w dalszym ciągu są to znaczne ilości, które wciąż wymagają poszukiwań możliwości ich zmniejszenia.



Rys. 2.5.1. Jednostkowe zużycie energii w przemyśle celulozowo-papierniczym krajów CEPI (CEPI Annual Statistics 2009)

Bilans energetyczny papierni w ogólnym zarysie obejmuje ilość energii wewnętrznej, kinetycznej i potencjalnej wprowadzanej i odprowadzanej z tego układu technologicznego. Według Przybysza (1995) głównymi źródłami energii są: woda (E_{ws}), półprodukty włókniste (E_{ps}), para grzejna oraz energia wynikająca z pracy maszyn. Odprowadzenie energii następuje poprzez strumienie ścieków i odpadów (E_m), w wytwarzanych produktach (E_{pap}) oraz w postaci różnego rodzaju strat energii E_{st} (wentylacja, rekuperacja, systemy chłodzenia, rozpraszanie energii do otoczenia itp.).

Zhou et al. (2010) w swym modelu bilansu energetycznego wybranych urządzeń przemysłu papierniczego dodatkowo uszczegółowił ten bilans włączając do niego wszystkie, najczęściej wykorzystywane nośniki energii (paliwa ciekłe, stałe i gazowe oraz energia elektryczna).

Uzupełniając więc bilans energetyczny Przybysza (1995) o sumę energii dostarczonej przez jej nośniki E_{ne} oraz wprowadzając energię użyteczną układu EX (energię, która jest całkowicie przekształcana na pracę maszyn i urządzeń), ogólną równowagę energetyczną w układzie technologicznym papierni można wyrazić wzorem (2.7):

$$\frac{dE}{dt} = \sum E_{ws} + \sum E_{ps} + \sum E_{ne} - \sum EX - \sum E_{pap} - \sum E_{sc} - \sum E_{st} \quad (2.7)$$

W analizie pracy układu technologicznego maszyny papierniczej bilans energetyczny jest często sprowadzany do analizy rozplywu energii cieplnej w tym układzie. Wynika to z faktu, że w wielu przypadkach energię kinetyczną i potencjalną można zaniedbać (Luyben, 1976). Wówczas w rozważaniach uwzględnia się jedynie energię wewnętrzną U . Energia wewnętrzna każdego ze strumieni jest funkcją składu, ciśnienia i przede wszystkim temperatury. Jeżeli uwzględnimy to we wzorze [8] i dodatkowo uprości się go w ten sposób, że sumę strumieni wejściowych potraktuje się jako jeden strumień energii wejściowej, a sumę strumieni wyjściowych potraktuje się jako jeden strumień energii wyjściowej z układu, to wzór (2.7) przyjmie postać (2.8):

$$\frac{d(\rho V U)}{dt} = \sum (F_{we} \rho_{we} h_{we}) - \sum (F_{wy} \rho_{wy} h_{wy}) \quad (2.8)$$

Najczęściej wyznacza się zmiany entalpii w układzie, a nie energii wewnętrznej i zakładając, że w porównaniu z wartością energii wewnętrznej U wielkość PV można zaniedbać (Luyben, 1976), to uzyskuje się zależność (2.9):

$$\frac{d(\rho V h)}{dt} = \sum (F_{we} \rho_{we} h_{we}) - \sum (F_{wy} \rho_{wy} h_{wy}) \quad (2.9)$$

Zakładając, że entalpię można przedstawić w postaci równania (2.10):

$$h = C_p T \quad (2.10)$$

wówczas otrzymuje się równanie (2.11):

$$\rho C_p \frac{d(VT)}{dt} = \rho C_p (\sum(F_{we} T_{we}) - \sum(F_{wy} T_{wy})) \quad (2.11)$$

Konsekwencją różnicy między ilością dostarczonej i odbieranej z układu technologicznego energii cieplnej jest ustalenie się określonej wartości temperatury w tym układzie. Temperatura ta jest wyznacznikiem równowagi cieplnej.

Uproszczenie analizy równowagi energetycznej do analizy równowagi cieplnej wynika również z faktu, że to właśnie zmiany energii cieplnej w układzie technologicznym mają największy i bezpośredni wpływ na szereg właściwości fizykochemicznych substancji biorących udział w procesie produkcyjnym oraz na przebieg wielu operacji jednostkowych (np. rozwłóknianie, mielenie – Biermann, 1996, Baker, 2000). Efektem tego wpływu są zmiany poszczególnych równowag cząstkowych (Przybysz, 1995).

Wraz z ograniczaniem zużycia wody świeżej wzrasta temperatura wewnątrz układu wodno-masowego papierni i może sięgnąć nawet 80°C. O ile temperatura rzędu 40-50°C jest nawet pożądana, to wyższe wartości mają zdecydowanie negatywny wpływ na proces produkcyjny. W tabeli 2.3 zestawiono zalety i wady wzrostu temperatury w układzie wodno-masowym papierni.

Tabela 2.3. Wady i zalety zwiększonej temperatury (powyżej 50°C) wód obiegowych w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej (Aquafit4use 2010)

Zalety	Wady
<ul style="list-style-type: none"> • obniżenie lepkości wody i poprawa odwadnialności wstęgi papieru • możliwość zaoszczędzenia energii 	<ul style="list-style-type: none"> • przyspieszony rozwój mikroorganizmów • przyspieszenie korozji instalacji, częstsze uszkodzenia odzieży maszynowej • uciążliwe warunki pracy, zagrożenie dla zdrowia • problemy z uzyskaniem właściwego zaklejenia papieru • pogorszenie efektywności działania enzymów • ograniczenie efektywności pracy pomp próżniowych • zwiększenie rozpuszczalności substancji niepożądanych, rezydujących w surowcu włóknistym

Najprostszym rozwiązaniem, które pozwala ograniczyć problemy związane ze zbyt wysoką temperaturą, jest chłodzenie wód technologicznych. W tym celu można wykorzystać np. wieże chłodnicze bądź otwarte laguny chłodzące. W świetle przedstawionych wcześniej danych dotyczących dużej energochłonności przemysłu papierniczego są to jednak rozwiązania nieoptymalne. Dlatego też w ostatnich latach zaczyna się upowszechniać tendencja do zagospodarowywania nadmiaru energii kumulującej się w układzie technologicznym. Wyrazem tego jest wprowadzanie technologii CHP, która polega na wykorzystaniu energii cieplnej do generowania energii elektrycznej (Schmitz, 2009). Oprócz tego cały czas dąży się do zastępowania aparatury urządzeniami energooszczędnymi oraz zmniejszenia ogólnej pojemności cieplnej układu poprzez zmniejszenie pojemności układu wodno-masowego: uproszczenie jego budowy, likwidację zbiorników buforowych i zmniejszenie średnic rurociągów kosztem zwiększenia natężeń przepływu (Meinander, 2003).

Dokładny bilans energetyczny układu technologicznego maszyny papierniczej i papierni jest zagadnieniem niezwykle skomplikowanym, uzależnionym nie tylko od wymienionych wcześniej strumieni energii, ale także od innych warunków – lokalizacji zakładu, zastosowanych rozwiązań technicznych (np. otwartych kanałów) czy nawet pór roku (Kontu et al., 2010).

Z powyższych powodów równowaga energetyczna nie była uwzględniana w opracowywanym modelu i programie symulacyjnym.

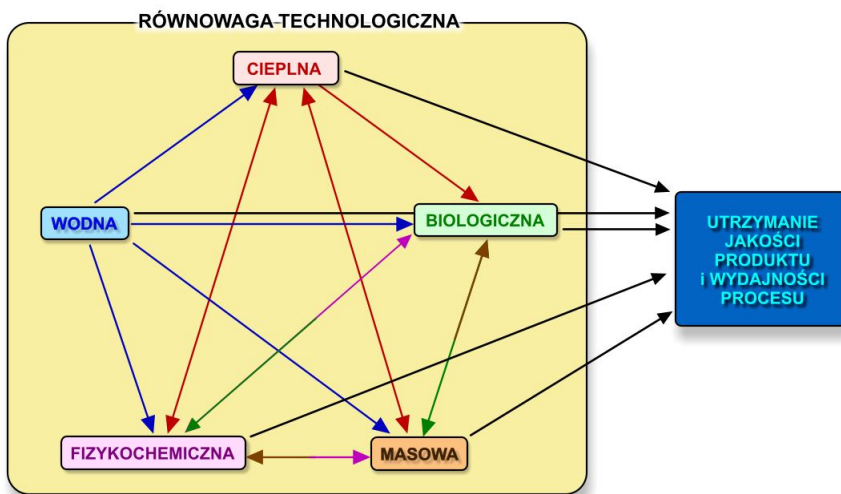
2.6. Współdziałanie równowag cząstkowych

Z punktu widzenia procesu produkcji papieru najbardziej istotny jest fakt, że wszystkie równowagi cząstkowe są ze sobą powiązane (sprzężone).

W konsekwencji każdorazowa zmiana stanu którejkolwiek z równowag wpływa w sposób bezpośredni na stan układu technologicznego, a ponadto oddziałując na stan pozostałych równowag cząstkowych wpływa na ten układ również w sposób pośredni. Te trudne do ścisłego sprecyzowania i matematycznego opisu oddziaływania wtórne między poszczególnymi równowagami cząstkowymi stanowią poważną przeszkodę w podejmowanych próbach opracowania pełnego modelu układu wodno-masowego maszyny papierniczej. Sytuację tę przedstawiono w sposób poglądowy na rys. 2.6.1.

Zaburzenie jednej równowagi cząstkowej może w krótkim czasie doprowadzić do destabilizacji całego procesu produkcyjnego. Przykładowo: ograniczanie zużycia wody świeżej powoduje wzrost ilości zawiesiny cząstek masy papierniczej w wodzie obiegowej (równowaga masowa), wzrost stężenia substancji rozpuszczonych (równowaga fizykochemiczna) oraz wzrost temperatury wody obiegowej (równowaga cieplna). Czynniki te wpływają na ilość i rodzaj mikroorganizmów w układzie (równowaga mikrobiologiczna). Wzrost temperatury ułatwia dodatkowo odwadnianie wstęgi papierniczej, co wpływa na retencję

na sicie. Efektem są dalsze zmiany równowag masowej i fizykochemicznej (zmiana stężenia cząstek masy papierniczej i substancji rozpuszczonych w wodzie obiegowej).



Rys. 2.6.1. Wzajemne oddziaływanie poszczególnych równowag cząstkowych w papierni

Z punktu widzenia obsługi procesu produkcyjnego, w przypadku zmiany równowagi technologicznej do najbardziej istotnych informacji, które pozwalają na podjęcie właściwych kroków celem ewentualnego przeciwdziałania jej negatywnym skutkom, należą:

- znajomość zakresu zmian zachodzących w poszczególnych równowagach cząstkowych,
- znajomość czasu potrzebnego do ustalenia się nowej równowagi technologicznej,
- znajomość wpływu zmian zachodzących w poszczególnych równowagach cząstkowych na przebieg procesu produkcyjnego.

Wszelkie rozważania dotyczące zmian równowagi technologicznej powinny więc być prowadzone z uwzględnieniem również i tych czynników.

3. CEL I ZAKRES PRACY

Celem podjętej pracy było opracowanie matematycznego modelu obiegu wody, substancji stałych i rozpuszczonych w tzw. części „mokrej” maszyny papierniczej wraz z przyległymi obiegami (I i II) wody technologicznej. Drugim celem było stworzenie na bazie uzyskanych zależności matematycznych symulatora komputerowego, który umożliwiłby jakościowe i ilościowe określenie zmian zachodzących w następujących równowagach cząstkowych procesu produkcji papieru: wodnej, masowej i fizykochemicznej (wyrażonych za pomocą odpowiednich wskaźników charakteryzujących te równowagi). Założono, że program powinien również umożliwiać wyznaczanie czasu potrzebnego do ustalenia się nowej równowagi technologicznej (procesowej) w przypadku jej zachwiania.

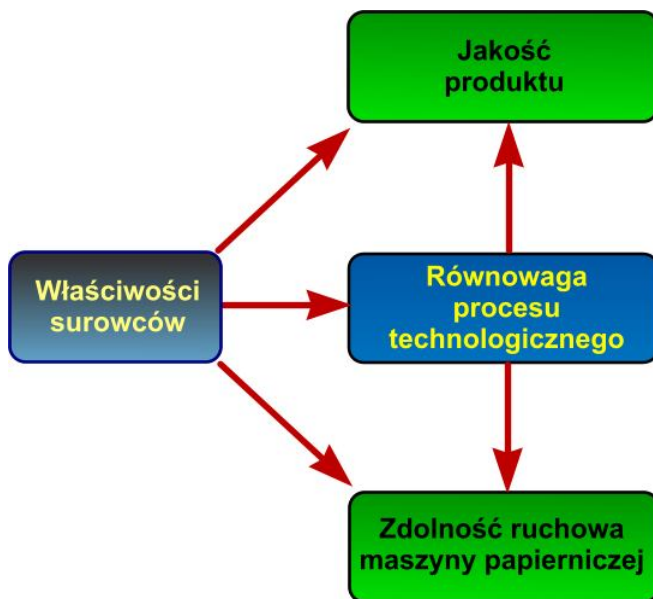
Zakres wykonanych prac obejmował:

- wykonanie badań laboratoryjnych pozwalających na określenie wpływu najważniejszych właściwości masy papierniczej na modelowane równowagi cząstkowe,
- opracowanie modelu matematycznego zmian właściwości surowca włóknistego,
- opracowanie modelu matematycznego układu wodno-masowego maszyny papierniczej,
- opracowanie uproszczonego modelu matematycznego wiążącego właściwości surowca, równowagę technologiczną i zdolność ruchową maszyny papierniczej,
- samodzielne napisanie komputerowego programu symulacyjnego wykorzystującego opracowane modele matematyczne.

Model bilansowy został sporządzony dla układu pięcioskładnikowego, składającego się z: wody, frakcji włóknistej, frakcji drobnej, organicznych substancji rozpuszczalnych i nieorganicznych substancji rozpuszczalnych.

4. ANALIZA NAJWAŻNIEJSZYCH CZYNNIKÓW WPLYWAJĄCYCH NA RÓWNOWAGĘ MASOWĄ I FIZYKO- CHEMICZNĄ UKŁADU WODNO-MASOWEGO MASZINY PAPIERNICZEJ – WYZNACZANIE PARAMETRÓW WEJŚCIOWYCH I WARTOŚCI GRANICZNYCH DLA MODELU

Jednym z czynników, który w znacznym stopniu determinuje przebieg procesu produkcji papieru są właściwości stosowanych surowców, a w szczególności właściwości masy papierniczej. Ogólnie pokazano to na rys. 4.1. Właściwości masy papierniczej (m.in. rodzaj masy, stopień spęcznienia jej frakcji włóknistej i frakcji drobnej, ilość frakcji drobnej, zawartość organicznych i nieorganicznych substancji rozpuszczalnych) decydują w sposób bezpośredni o jakości papieru, a poprzez wpływ na równowagę wodno-masową i fizykochemiczną w układzie technologicznym wpływają na tę jakość również pośrednio – w sposób wtórny. Oprócz tego surowce włókniste (na skutek określonej zdolności do odwadniania) w znacznym stopniu odpowiadają za tzw. zdolność ruchową maszyny papierniczej (a tym samym za jej wydajność). Dlatego też przy opracowywaniu modelu układu wodno-masowego maszyny papierniczej wykonano również badania mające na celu określenie możliwości stworzenia modelu właściwości masy papierniczej. W badaniach tych surowiec włóknisty potraktowano jako układ dwuskładnikowy składający się z frakcji włóknistej i frakcji drobnej.



Rys. 4.1. Wpływ właściwości surowców na proces technologiczny

W toku dalszych rozważań pod kątem budowy modelu omawianego układu technologicznego uznano, że dla obliczeń związanych z równowagą masową najistotniejsze będzie określenie następujących czynników:

- przebiegu powstawania frakcji drobnej w ciągu technologicznym papierni i jej wpływu na zdolność do odwadniania masy papierniczej,
- przebiegu zmian stopnia spęcznienia masy papierniczej podczas jej przetwarzania (mielenia) i wpływu tego wskaźnika na właściwości wytrzymałościowe produkowanego papieru.

W przypadku rozważań dotyczących równowagi fizykochemicznej stwierdzono natomiast, że czynnikami mogącymi zwiększyć dokładność opracowywanego modelu mogą być analizy:

- szybkości wydzielania się substancji rozpuszczalnych z półproduktów włóknistych i ocena ilości tych substancji,
- zdefiniowanie charakterystyk narastania substancji rozpuszczalnych podczas zmniejszania jednostkowego zużycia wody świeżej.

W badaniach dotyczących równowagi fizykochemicznej podzielono ogół substancji rozpuszczonych na substancje pochodzenia organicznego i nieorganicznego. Zastosowanie takiej klasyfikacji umożliwiło wykonanie dokładniejszej analizy z wykorzystaniem ogólnie przyjętych wskaźników jakości wody. Za substancje organiczne można z pewnym przybliżeniem uznać te, które wpływają na wskaźnik ChZT, zaś substancjami nieorganicznymi są związki dysocjujące i zmieniające przewodność właściwą wody (Novak, 2003). Zatem ilość substancji organicznych w badanych wodach technologicznych była określana wskaźnikiem ChZT w mg O₂/dm³, natomiast ilość substancji nieorganicznych wyrażano za pomocą wskaźnika przewodności właściwej w μS/cm.

Warto pamiętać, że rozpadowi na jony mogą ulegać związki, w których występują wiązania jonowe lub bardzo silnie spolaryzowane wiązania kowalencyjne. Należą także do nich niektóre związki organiczne, np. rozpuszczalne w wodzie kwasy karboksylowe i ich sole, niektóre zasady organiczne (aminy) oraz niektóre kompleksy polimerowe. W przypadku produkcji, w której wykorzystywane są masy lignocelulozowe, częściowej dysocjacji ulega również celuloza z racji obecności w jej łańcuchach grup karboksylowych. Również hemicelulozy, głównie ze względu na obecność kwasów uronowych, zachowują się jak polielektrolity (Ek et al., 2009, Kupryszewski, 1988, Pranovich et al., 2005). Stopień dysocjacji danego związku determinuje moc tworzonego przezeń elektrolitu. W większości przypadków rozpuszczone sole nieorganiczne są elektrolitami mocniejszymi niż związki organiczne. Zatem przy występującym nadmiarze soli nieorganicznych w oznaczanym roztworze, wpływ związków organicznych może być w wielu przypadkach pomijalnie mały (Light et al., 2005). Z punktu widzenia praktyki przemysłowej podstawą do zastosowania obu powyższych wskaźników było założenie, że większość substancji nieorganicznych

mogących znaleźć się w wodach układu technologicznego ulega dysocjacji elektrolitycznej oraz substancje te nie podlegają utlenianiu przy oznaczeniu wskaźnika ChZT.

4.1. Metodyka badań

Rodzaje badanych mas włóknistych

W badaniach wykorzystano 7 różnych rodzajów mas włóknistych: 6 pierwotnych i 1 wtórną (makulaturową). Były to:

- masa siarczanowa niebielona (SaNbl) wytworzona z drewna iglastego sosnowego,
- masa siarczanowa bielona (Sabl) wytworzona z drewna iglastego sosnowego,
- masa siarczanowa bielona (Sabl) wytworzona z drewna liściastego brzoźowego,
- masa mechaniczna (ścier) sosnowa,
- masa termomechaniczna (TMP) z drewna liściastego brzoźowego,
- masa chemotermomechaniczna (CTMP) z drewna liściastego brzoźowego,
- masa makulaturowa OCC.

Pierwsze trzy masy włókniste były tzw. masami bezdrzewnymi, uzyskiwanymi w procesie roztwarzania chemicznego, kolejne trzy to wysokowydajne masy drzewne. Ostatni surowiec to masa makulaturowa OCC przygotowana na bazie zużytych pudeł oraz arkuszy tektury falistej. Wszystkie masy włókniste zostały pozyskane w postaci stałej (suchej) z krajowych celulozowni i papierni.

Przygotowanie próbek

Badane masy – o ściśle oznaczonej zawartości suchej substancji – rozwłókniano w laboratoryjnym rozwłókniaczu wirowym przy prędkości obrotowej wirnika 3000 obr/min.

Do oznaczeń wskaźnika przewodności właściwej i chemicznego zapotrzebowania tlenu (ChZT) próbki były odsączane próżniowo na lejku Büchnera. Jako sączek wykorzystano syntetyczne sito polimerowe o gęstości 256 oczek/mm². Taka gęstość sita zapobiegała przedostawaniu się do uzyskanej próbki frakcji drobnej, której obecność mogłaby zniekształcić pomiary. W warunkach laboratoryjnych, przy badaniach desorpcji organicznych i nieorganicznych substancji rozpuszczalnych z mas włóknistych wykorzystywano wodę destylowaną o początkowej przewodności właściwej równej 4,1 μS/cm i wartości ChZT = 0 mg O₂/dm³.

Mielenie masy papierniczej

Proces mielenia przeprowadzono w półtechnicznym stanowisku doświadczalnym wyposażonym w młyn stożkowy typu R1L firmy Escher-Wyss

pracujący w systemie okresowo-ciągłym. Konfiguracja stanowiska pozwoliła na zapewnienie warunków procesu porównywalnych z warunkami przemysłowymi. Stanowisko posiadało komputerowy system pomiaru natężenia przepływu mielonej masy sterujący również zaworem spustowym górnego zbiornika. Jednorazowy wsad mielonej masy wynosił 3 kg bezwzględnie suchej masy. Stałe parametry mielenia wyglądały następująco: stężenie mielonej masy: 3%, prędkość obrotowa wirnika młyna: 900 obr/min, natężenie przepływu masy przez młyn: $1,5 \text{ dm}^3/\text{s}$.

Do kontroli intensywności mielenia zastosowano wskaźnik SEL. Ponieważ układ noży w młynie oraz prędkość obrotowa wirnika były stałe, zatem sekundowa długość tnąca CEL też się nie zmieniała. Czynnikiem zmiennym było więc wyłącznie obciążenie młyna mocą efektywną. Natomiast wskaźnik jednostkowego zużycia energii efektywnej uwzględniający stosunek zużywanej energii do ilości mielonej masy suchej wykorzystano jako podstawę do oceny energetycznej efektywności prowadzonego procesu.

Oznaczenie smarności masy papierniczej

Wskaźnik smarności mielonej masy oznaczano zgodnie z PN-EN ISO 5267-1:2002/AC:2006.

Oznaczenie ilości frakcji drobnej

Próbkę o zawartości 150 g b.s. substancji przenoszono do stożkowego sortownika o objętości 120 dm^3 wyposażonego w sito sortownicze o gęstości 150 mesh. Próbkę tę przemywano wodą w łącznej ilości 2 m^3 . Po zakończeniu operacji próbkę przenoszono do rozwłókniacza, dopełniano wodą do objętości całkowitej 10 dm^3 i oznaczano jej stężenie. Na tej podstawie wyznaczano całkowitą ilość suchej substancji pozostałej po sortowaniu. Całkowitą ilość usuniętej frakcji drobnej określano metodą wagową, porównując bezwzględnie suchą masę wsadu przed i po przeprowadzonej operacji. Wynik stanowił średnią arytmetyczną z 2 pomiarów.

Oznaczenie stopnia spęczenia włókien (WRV)

Wskaźnik WRV był wyznaczany według normy SCAN-C 102 XE. Wynik stanowił średnią arytmetyczną z 4 pomiarów.

Oznaczenie przewodności właściwej

Ilość nieorganicznych substancji rozpuszczalnych przenikających z badanej masy włóknistej do otaczającej je wody oznaczano za pomocą wskaźnika przewodności właściwej. Pomiar wykonywano przy użyciu miernika CX-401 firmy „ELMETRON” wyposażonego w układ kompensacji wpływu temperatury. Wynik stanowił średnią arytmetyczną z 4 pomiarów.

Oznaczenie chemicznego zapotrzebowania tlenu (ChZT)

Ilość organicznych substancji rozpuszczalnych przenikających z mas włóknistych do otaczającej je wody oznaczano za pomocą wskaźnika ChZT. Oznaczenie to wykonywano zawsze dla próbek pozbawionych frakcji drobnej i wszelkich innych cząstek ciał stałych (patrz opis „Przygotowanie próbek”). Chemiczne zapotrzebowanie tlenu oznaczano metodą analizy spektrofotometrycznej przy użyciu spektrofotometru VEGA 400 firmy „MERCK” zgodnie z normą PN-ISO 15705:2005. Wynik stanowił średnią arytmetyczną z 3 pomiarów.

Oznaczenie mętności wody podsitowej

Pomiar mętności przeprowadzано wykorzystując aparat CheckitDirect firmy Lovibond. Przed każdym pomiarem wykonywana była czteropunktowa kalibracja aparatu. Sam pomiar wykonywany był automatycznie, wartość oznaczanego wskaźnika odczytywana była z wyświetlacza w jednostkach NTU. Wynik stanowił średnią arytmetyczną z 4 pomiarów.

Oznaczenie stopnia zatrzymania (retencji) na sicie

Stopień zatrzymania masy papierniczej na sicie maszyny papierniczej (bądź sicie laboratoryjnego urządzenia do formowania papieru) oznaczano na podstawie stężenia zawiesiny włóknistej wylewanej na sito oraz stężenia odciekającej wody podsitowej. Retencję obliczano ze wzoru (2.3). Wynik stanowił średnią arytmetyczną z 2 pomiarów.

Oznaczenie wskaźnika samozerwalności papieru

Wskaźnik samozerwalności próbek papieru oznaczano zgodnie z normą EN-ISO 1924-2:2008.

W tabeli 4.1 podano informację odnośnie typowych dokładności uzyskiwanych podczas wykonywanych oznaczeń.

Tabela 4.1. Uzyskane dokładności wykonywanych oznaczeń
(metoda Studenta-Fischera, poziom ufności = 95%)

Nazwa oznaczenia	Średni błąd kwadratowy	Odchylenie standardowe
Smarność [°SR]	0,24	0,76
Zawartość frakcji drobnej [%]	0,4	1,12
WRV [%]	0,0732	0,17
Przewodność właściwa [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	1,65	7,1
ChZT [$\text{mg O}_2/\text{dm}^3$]	3,2	10,1
Mętność [NTU]	1,6	6,6
Samozerwalność [m]	50,0	105,1
Retencja [%]	3,63	9,4

Analiza matematyczna wyników badań

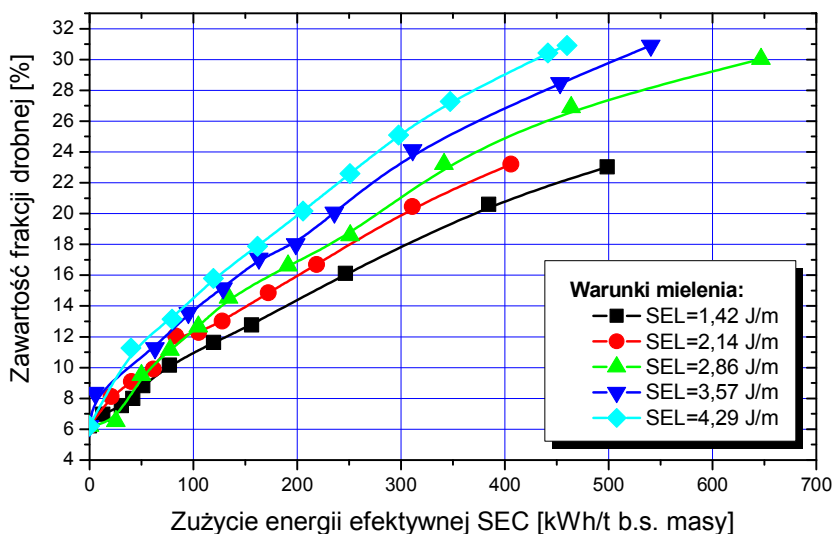
Uzyskiwane wyniki badań były poddawane analizie matematycznej w celu uzyskania empirycznych zależności pomiędzy badanymi wskaźnikami. Analizę tę wykonywano przy użyciu programu OriginPro w wersji 8.5.

4.2. Badania nad powstawaniem frakcji drobnej w ciągu technologicznym papierni

Powszechnie wiadomo, że największa ilość frakcji drobnej (będącej głównym składnikiem zawiesiny zawartej w wodzie obiegowej) powstaje podczas procesu mielenia, tworząc razem z początkową, niewielką ilością frakcji pierwotnej, ogólny strumień frakcji drobnej trafiający w masie papierniczej do maszyny papierniczej, gdzie następuje rozdział tego strumienia.

Przedstawione badania wykonano dla jednej masy włóknistej. Była to masa Sabl z drewna iglastego (sosnowa). Zastosowane parametry mielenia opisano w metodyce badań.

W wyniku przeprowadzonych mieleni doświadczalnych (rys. 4.2.1), w których stosowano różne obciążenia krawędzi tnącej (wyrażone wskaźnikiem SEL), stwierdzono, że ilość wydzielającej się wtórnej frakcji drobnej oraz kinetyka jej wydzielania zależą od zastosowanej intensywności mielenia. Największy i najszybszy przyrost ilości frakcji drobnej uzyskano dla najwyższych obciążeń krawędzi tnącej ($SEL = 4,29 \text{ J/m}$). Dla tego przypadku końcowa zawartość frakcji drobnej w masie była większa o ok. 10% od ilości wydzielonej przy mieleniu z najmniejszym obciążeniem krawędzi tnącej ($SEL = 1,42 \text{ J/m}$).



Rys. 4.2.1. Wpływ warunków procesu mielenia masy Sabl na ilość wydzielającej się frakcji drobnej

Ponieważ wiadomo, że frakcja drobna silnie obniża zdolność do odwadniania masy papierniczej, w następnym etapie postanowiono ocenić wpływ ilości frakcji drobnej na zdolność do odwadniania masy papierniczej.

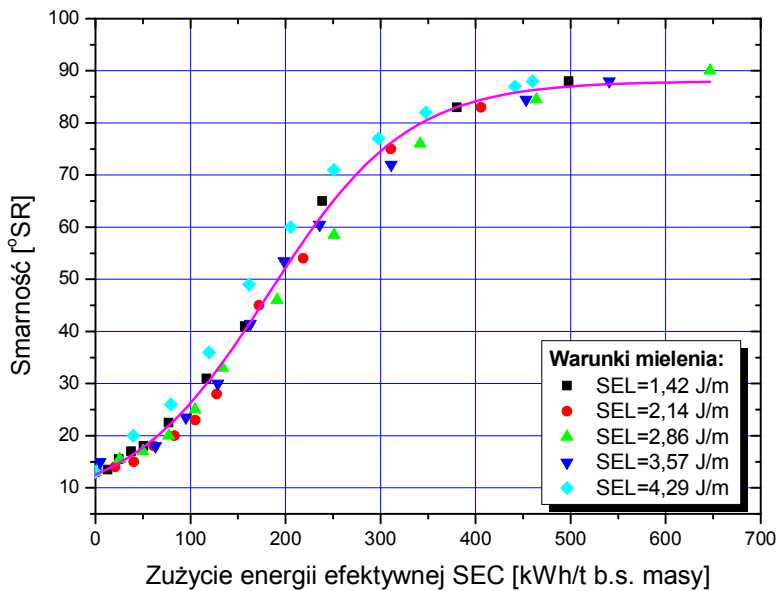
Obecnie najbardziej rozpowszechnioną miarą zdolności do odwadniania masy papierniczej (i jednocześnie miarą zawartości frakcji drobnej w masie papierniczej) jest tzw. smarność masy, dlatego ten wskaźnik został wykorzystany w niniejszych badaniach.

Wykres 4.2.2 pokazuje wyniki badań wpływu warunków prowadzenia procesu mielenia na zdolność do odwadniania masy papierniczej mierzonej za pomocą wskaźnika smarności. Uzyskane wyniki wskazują, że w badanych warunkach smarność masy wzrastała według charakterystycznej dla tego parametru krzywej w kształcie litery „S” i była proporcjonalna do zużytej energii efektywnej mielenia, niezależnie od stosowanych obciążeń krawędzi tnącej SEL.

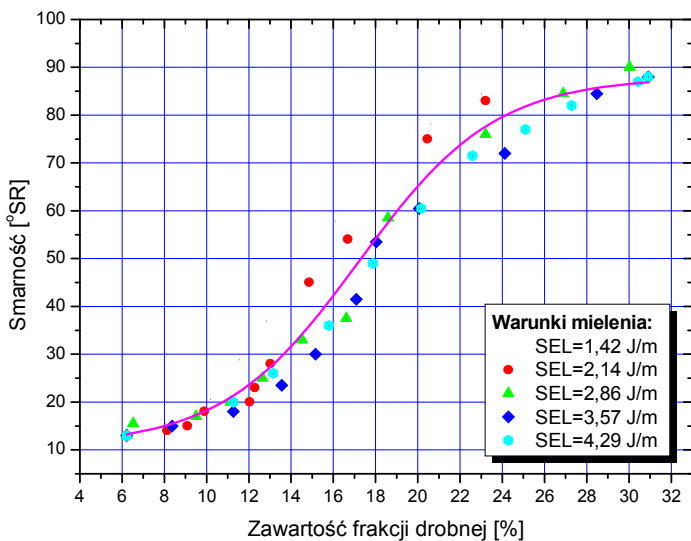
Dalsze porównania zależności między smarnością i ilością frakcji drobnej zawartej w mielonej masie włóknistej pokazały, że oba te parametry są również ściśle od siebie uzależnione. Wyniki przedstawione na wykresie 4.2.3 wskazują, że zdolność do odwadniania masy papierniczej mierzonej za pomocą wskaźnika smarności wzrasta wraz z rosnącą zawartością frakcji drobnej w tej masie zgodnie z krzywą przedstawioną na tym wykresie. Kształt tej krzywej (również zbliżony do litery „S”) wskazuje, że niewielkie ilości frakcji drobnej stosunkowo słabo zmieniają odwadnialność masy papierniczej. Jednakże po przekroczeniu ok. 12-15% zawartości frakcji drobnej w masie, zdolność do odwadniania zaczyna maleć praktycznie liniowo. W ostatniej fazie, przy zawartości frakcji drobnej przekraczającej 30%, następuje ponowne spowolnienie zmian w odwadnialności.

Na podstawie uzyskanych wyników uznano, że można przyjąć z niewielkim błędem, iż dla badanej masy włóknistej, niezależnie od intensywności prowadzonego mielenia mierzonego wskaźnikiem SEL, zdolność do odwadniania tej masy jest funkcją przyrostu ilości wydzielającej się frakcji drobnej. Stąd wyznaczono empiryczny wzór ujmujący zależność między ilością zużytej energii efektywnej mielenia (SEC) i zmianą smarności mielonej masy SR:

$$SR = \frac{89,5}{1 + e^{-0,01177 * (SEC - 171,4)}} \quad (4.1)$$



Rys. 4.2.2. Wpływ warunków prowadzenia procesu mielenia masy Sabli na jej zdolność do odwadniania mierzonej za pomocą wskaźnika smarności



Rys. 4.2.3. Porównanie zależności ilości frakcji drobnej wydzielającej się w trakcie mielenia na zdolność do odwadniania masy papirniczej mierzonej za pomocą wskaźnika smarności

Wykonana analiza matematyczna pozwoliła na wyznaczenie empirycznego wzoru (4.2), który dla danej smarności masy włóknistej umożliwia wyznaczenie ilości zawartej w niej frakcji drobnej:

$$x_{fr} = 0,05 * \ln\left(-\frac{1}{0,013 * SR - 1,14} - 1\right) + 0,3 \quad (4.2)$$

Jednocześnie po przekształceniu względem wskaźnika SR wzór ten przybiera postać (4.3):

$$SR = 87,946 - \frac{77,121}{\frac{x_{fr} - 0,3}{1 + e^{0,05}}}, \text{ } ^\circ SR \quad (4.3)$$

Tym samym pozwala on dla danej zawartości frakcji drobnej w masie papierniczej na wyznaczenie smarności tej masy, a tym samym jej zdolności do odwadniania.

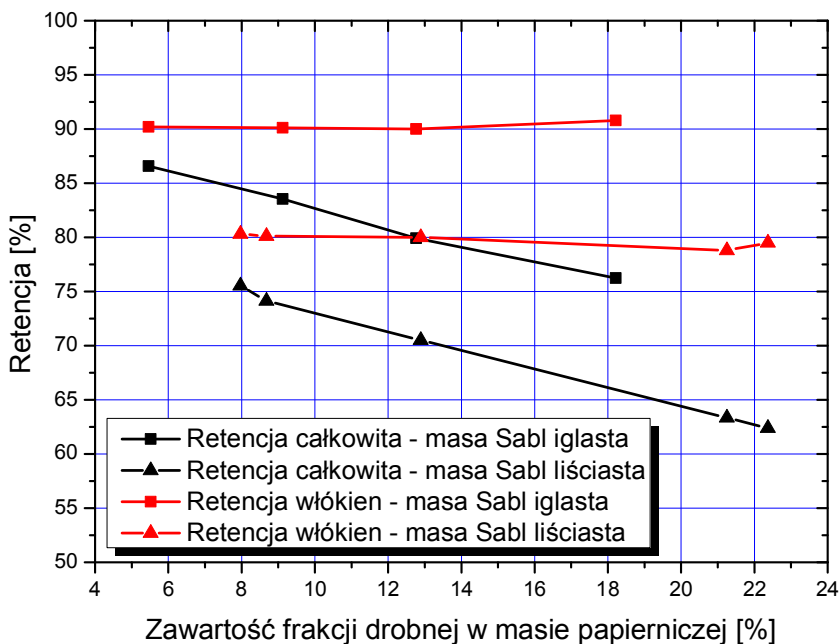
Oczywiście w przypadku mielenia innych rodzajów mas włóknistych wartości poszczególnych współczynników będą się najprawdopodobniej nieco różnić. Ze względu na wiele różnych rodzajów mas włóknistych stosowanych w technologii papieru, w zależności od potrzeby konieczne jest niestety każdorazowe wyznaczanie tych współczynników.

4.3. Rozdział poszczególnych frakcji masy papierniczej w trakcie jej odwadniania na sicie maszyny papierniczej

W rzeczywistym układzie technologicznym, który stanowił bazę dla tworzonoego modelu, produkowany był papier na bazie masy celulozowej Sabl. Przy analizie rozdziału frakcji drobnej w sekcji formującej maszyny papierniczej założono, że w modelowanym układzie technologicznym występują dwa składniki stałe: frakcja włóknista i frakcja drobna. W sekcji formującej maszyny papierniczej następuje rozdział obu składników, jednakże każdy z nich charakteryzuje się inną retencją, co potwierdzają badania, np. Orcotomy et al. (1999), Graffa (1991) oraz badania własne.

Wykonane badania laboratoryjne wskazują (rys. 4.3.1), że retencja frakcji włóknistej dla danej masy włóknistej jest praktycznie stała, zatem retencja pierwszego przejścia (będąca w tym przypadku też retencją całkowitą) jest głównie uzależniona od retencji frakcji drobnej. Różnice w retencji frakcji włóknistej stwierdzono natomiast dla poszczególnych badanych mas włóknistych. W przypadku masy iglastej, retencja frakcji włóknistej wynosiła ok. 90%, a dla masy liściastej wartość tego wskaźnika kształtowała się na poziomie ok. 80%. Wartości te są zbliżone do wartości uzyskiwanych przez innych naukowców zajmujących się badaniami z tego zakresu. Wyniki dostępnych

w literaturze naukowej badań, których autorzy przeprowadzali doświadczenia w warunkach przemysłowych (np. Orcotoma et al., 1999, Graff, 1991), generalnie wskazują, że retencja frakcji włóknistej jest zwykle bardzo wysoka. Orcotoma et al. (1999) stwierdził, że retencja frakcji włóknistej może sięgać odpowiednio: 95-97% w części rejestrowej formera oraz aż 99% w strefie skrzynek ssących. Można więc założyć, że dla danej masy włóknistej i danego procesu formowania wstęgi papierniczej wystarczy jednorazowe oznaczenie retencji frakcji włóknistej, które z niewielkim błędem może być potem wykorzystywane do obliczeń niezależnie od wartości retencji pierwszego przejścia.



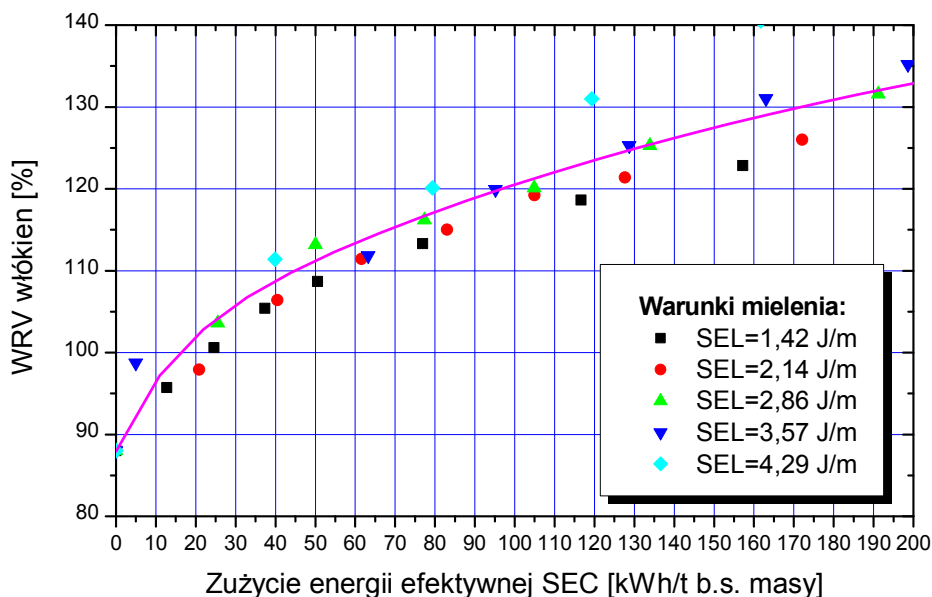
Rys. 4.3.1. Wyniki laboratoryjnych badań retencji poszczególnych składników dwóch mas włóknistych na standardowym sicie w aparacie Britt Jar Tester

4.4. Zmiana stopnia spęcznienia (WRV) frakcji włóknistej oraz frakcji drobnej masy papierniczej. Wpływ wskaźnika WRV włókien na właściwości wytrzymałościowe papieru

Głównym celem procesu mielenia papierniczych mas włóknistych jest rozwinięcie ich zdolności papierotwórczej, w szczególności wiąże się to z poprawą właściwości wytrzymałościowych wytwarzanego z tych mas papieru. Wskaźnikiem zmian zachodzących w mielonej masie, który jednocześnie dobrze koreluje z właściwościami wytrzymałościowymi papieru, jest stopień spęcznienia włókien WRV (Water Retention Value).

Fizycznie stopień spęcznienia masy papierniczej jest miarą ilości tzw. wody zatrzymanej w tej masie. Woda zatrzymana stanowi część całkowitej ilości wody, która w warunkach przemysłowych praktycznie nie może być usunięta w sposób mechaniczny. Oznacza to, że wody tej nie można usunąć ani w sekcji formującej, ani w prasowej. Zatem za pomocą wskaźnika WRV można określić graniczną ilość wody, która może być usunięta z odwadnianej wstęgi papierniczej. Na wartość WRV masy papierniczej składa się wartość WRV frakcji włóknistej oraz WRV frakcji drobnej, zgodnie ze wzorem (4.4):

$$WRV_m = (1 - x_{fr}) \cdot WRV_w + x_{fr} \cdot WRV_{fr} \quad (4.4)$$



Rys. 4.4.1. Zmiany WRV włókien w zależności od zużycia energii efektywnej mielenia dla mieleń wykonywanych przy różnym obciążeniu młyna mocą efektywną

Przedstawione badania wykonano również dla masy Sabl z drewna iglastego (sosnowej). Zastosowane parametry mielenia odpowiadały tym, które są opisane w metodyce badań.

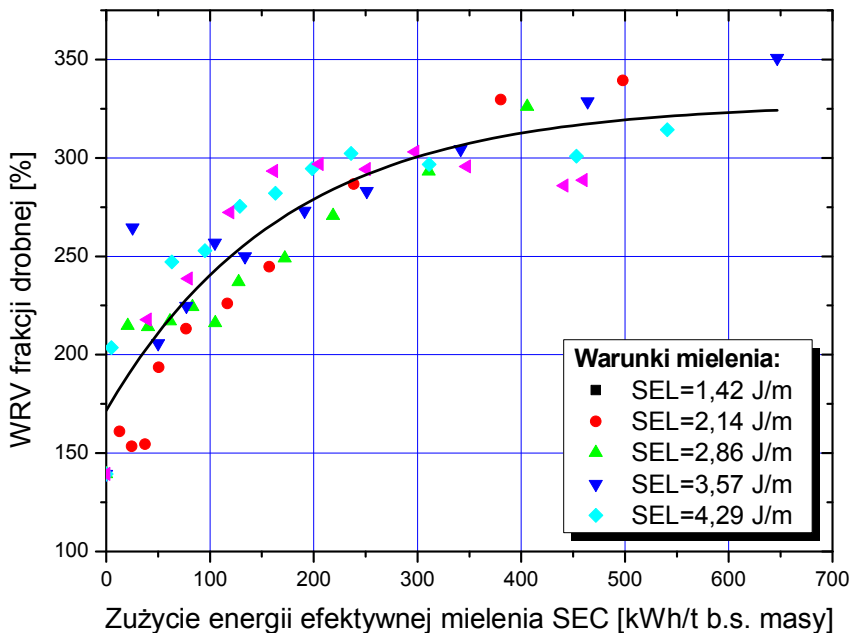
Rysunek 4.4.1 przedstawia zmiany WRV włókien w zależności od zużycia energii efektywnej mielenia. Otrzymane wyniki wskazują, że niezależnie od sposobu prowadzenia mielenia charakter przebiegu zmian wskaźnika WRV włókien w trakcie mielenia masy włóknistej jest stały, natomiast uzyskiwane wartości są uzależnione od sposobu prowadzenia mielenia. Stwierdzono m.in., że im większa wartość wskaźnika SEL, tym przyrost stopnia spęcznienia włókien staje się szybszy, zaś osiągnięte wartości graniczne tego wskaźnika – wyższe. Jednakże przy zużyciu jednostkowej energii efektywnej mielenia nieprzekracza-

jącego 200 kWh/t można było założyć, że różnice te były jeszcze pomijalnie małe. Dla badanej masy papierniczej Sabl zmiany wskaźnika WRV włókien w zależności od zużytej energii mielenia można zatem było przybliżyć ogólnym równaniem (4.5):

$$WRV_w = WRV_{w0} * E_{ef}^{0,12} \quad (4.5)$$

gdzie WRV_{w0} to wartość początkowa stopnia spęcznienia włókien (dla masy niemielonej).

Dla potrzeb niniejszej pracy wykonano również badania zmiany stopnia spęcznienia frakcji drobnej w trakcie mielenia badanej masy papierniczej. Uzyskane rezultaty zaprezentowano na rysunku 4.4.2. Jak wynika z przeprowadzonych doświadczeń, stopień spęcznienia frakcji drobnej (dla danych warunków procesu mielenia) rośnie wraz ze wzrostem zużytej energii efektywnej mielenia. Co istotne, stwierdzono, że w badanym zakresie można było uznać, że proces ten przebiegał praktycznie niezależnie od warunków prowadzenia mielenia (tzn. obciążenia młyna mocą efektywną).



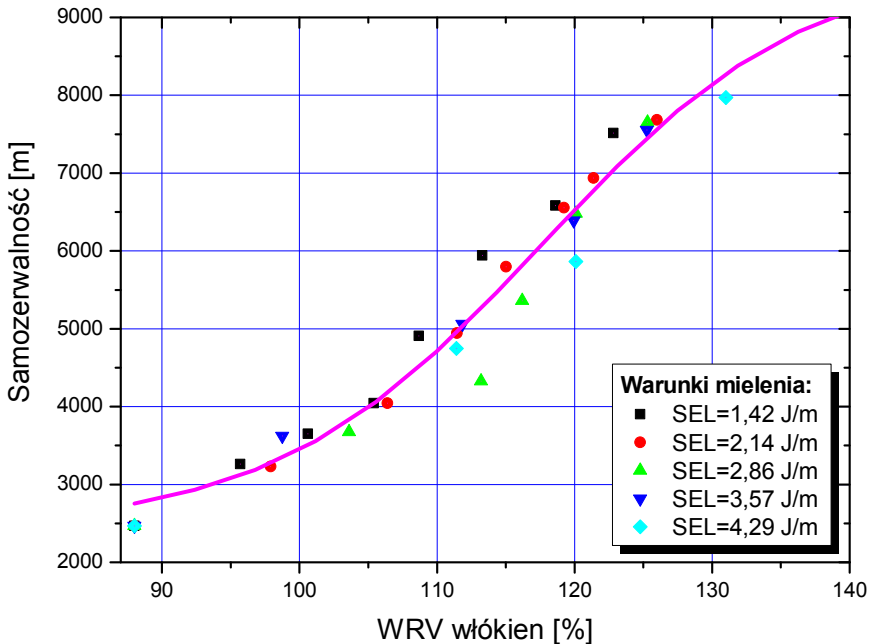
Rys. 4.4.2. Zmiany WRV frakcji drobnej w zależności od warunków mielenia

Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono ogólną zależność (4.6) dotyczącą zmian stopnia spęcznienia frakcji drobnej w badanej masie Sabl. Zależność ta ma postać:

$$WRV_{fr} = (327.87 - 156.3 \cdot 0.9942^{E_{ef}}) \quad (4.6)$$

Należy się spodziewać, że różne rodzaje mas włóknistych mogą mieć nieco inne charakterystyki przebiegu pęcznienia zarówno włókien, jak i frakcji drobnej w trakcie mielenia. Wówczas konieczne będzie wyznaczenie nowych współczynników dla opracowanych równań.

Model właściwości produkowanego papieru został oparty o wskaźnik samozerwalności – jeden z powszechnie stosowanych wskaźników wytrzymałościowych. Porównanie wpływu parametru WRV włókien na ten wskaźnik przedstawiono na rys. 4.4.3.



Rys. 4.4.3. Zależność samozerwalności papieru od stopnia spęcznienia włókien (charakteryzowanego wskaźnikiem WRV) dla mieleń wykonywanych przy różnym obciążeniu młyna mocą efektywną

Z przeprowadzonych badań (rys. 4.4.3) wynikało, że niezależnie od zastosowanej intensywności mielenia SEL, zależność między samozerwalnością i wskaźnikiem WRV włókien mogła być opisana jedną krzywą. To pozwoliło podjąć próbę wyznaczenia równania tej krzywej. Stwierdzono, że uzyskaną krzywą najdokładniej można opisać następującym równaniem (4.7):

$$sm = sm_{max} - \frac{7624}{1 + e^{\frac{WRV_w - 118,45}{10,23}}} \quad (4.7)$$

W równaniu tym wartość sm_{\max} odpowiada maksymalnej, możliwej do uzyskania samozewalności dla danej masy włóknistej. W przypadku badanej masy sm_{\max} było równe 10010.

Wiadomo, że warunkach przemysłowych parametry użytkowe produktu są wartościami odgórnie zakładanymi. Zatem równanie (4.7) stanowi podstawę do określenia wymaganego wskaźnika WRV włókien, który jest niezbędny do uzyskania założonej jakości produktu. Żeby uzyskać z kolei pożądaną wartość wskaźnika WRV włókien, konieczne jest odpowiednie przeprowadzenie operacji mielenia, w wyniku której uzyskuje się określony przyrost ilości frakcji drobnej w masie. Równania (4.3)-(4.7) pozwalają więc na powiązanie właściwości produktu z cząstkową równowagą masową układu technologicznego.

4.5. Szybkość wydzielania się substancji rozpuszczalnych z mas włóknistych

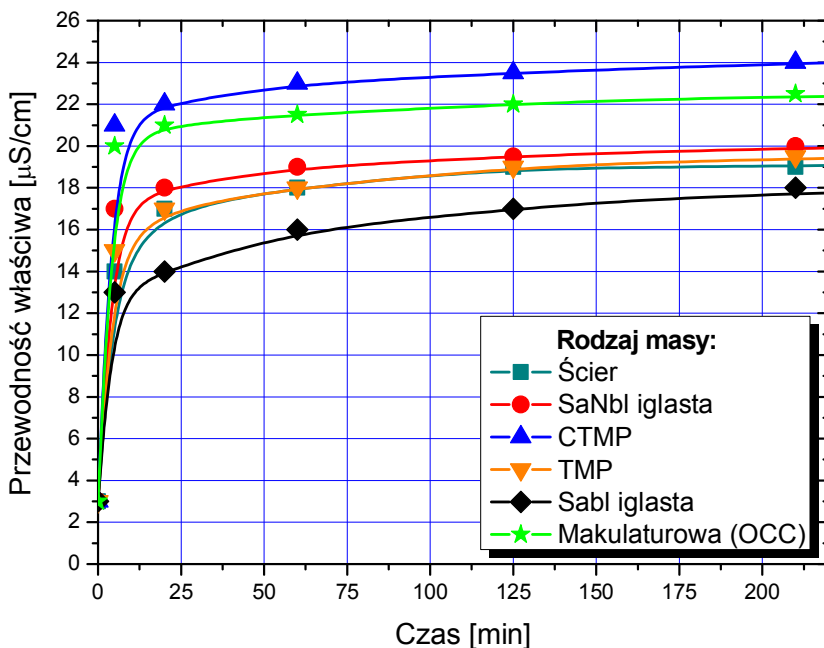
Każda masa włóknista zawiera w sobie różne substancje rozpuszczalne, które w wyniku operacji przygotowania zawiesiny włóknistej przenikają do wody technologicznej. Ponieważ każda masa włóknista posiada swoją własną, indywidualną „przeszość” (rodzaj surowca, sposób jego przerobu na masę włóknistą, w przypadku mas makulaturowych także sposób użytkowania), trudno jest wyznaczyć odgórnie, jaki ładunek substancji rozpuszczalnych każda z mas w sobie zawiera. Wielkość ta musi być więc za każdym razem określana indywidualnie.

Z punktu widzenia modelowania układu wodno-masowego równie istotny jest fakt, z jaką szybkością zanieczyszczenia te mogą przeniknąć do wody technologicznej. Dlatego też celem niniejszych badań było określenie czasów desorpcji substancji rozpuszczalnych z różnych rodzajów mas włóknistych w zależności od stężenia danej masy oraz temperatury panującej w układzie.

W niniejszych badaniach zastosowano 5 różnych mas włóknistych: trzy wysokowydajne masy drzewne (ścier, TMP i CTMP), dwie masy celulozowe bezdrzewne (SaNbl iglastą i Sabl iglastą) oraz masę makulaturową OCC.

Aby można było dokładniej określić zmiany zachodzące w badanym układzie, eksperymenty wykonano w warunkach modelowych, przy użyciu wody destylowanej.

Na rysunku 4.5.1 przedstawiono zmiany przewodności właściwej wody pod wpływem desorpcji nieorganicznych substancji rozpuszczalnych obecnych w badanych masach włóknistych. Z wykresu tego wynika, że dla badanych mas włóknistych czas osiągnięcia maksymalnego stężenia równowagowego był praktycznie wartością stałą, niezależną od rodzaju masy włóknistej. Dla wszystkich zbadanych mas przekraczał on 150 min. Z praktycznego punktu widzenia wydaje się, że bardziej istotnym wskaźnikiem może być czas, po którym w wodzie rozpuści się określona, znacząca z technologicznego punktu widzenia, ilość badanych substancji. W niniejszej pracy przyjęto, że będzie to czas osiągnięcia 90% maksymalnego stężenia równowagowego. Wskaźnik ten oznaczono jako t_{90} .



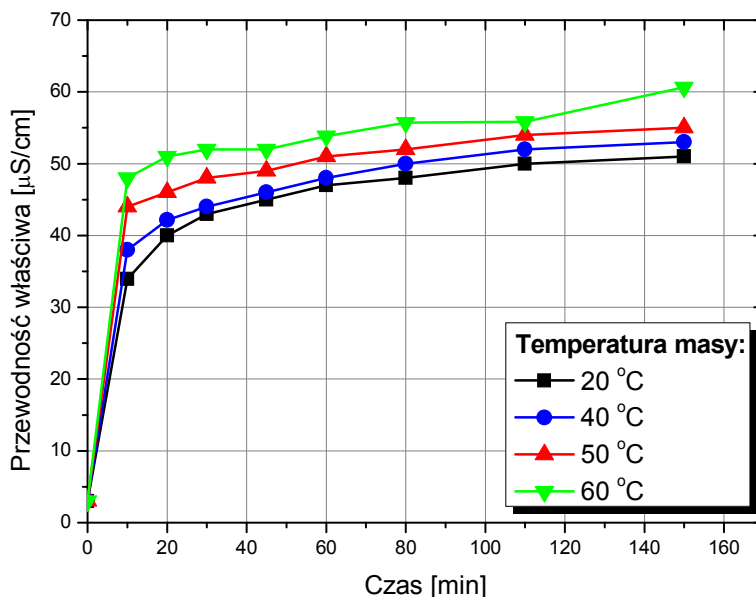
Rys. 4.5.1. Zmiany przewodności właściwej roztworu na skutek desorpcji nieorganicznych substancji rozpuszczonych obecnych w różnych papierniczych masach włóknistych (stężenie próbek = 0,1%, masy niemielone, T = 20°C)

W omawianym przypadku 90% substancji rozpuszczalnych przenikało do roztworu już po ok. 45 minutach. Po tym czasie przyrosty wskaźnika przewodności właściwej były już stosunkowo nieznaczne. Stwierdzono również, że rodzaj masy miał znaczny wpływ na ilość uwalnianych substancji, natomiast czas t_{90} dla poszczególnych mas różnił się nieznacznie, zatem można było przyjąć, że nie zależał on od rodzaju masy włóknistej. Największy przyrost przewodności właściwej uzyskano dla masy CTMP i masy makulaturowej. Najmniejsza zmiana przewodności właściwej została zarejestrowana dla masy makulaturowej. Użyty w niniejszych badaniach wskaźnik przewodności właściwej odzwierciedlał zarówno chemiczną charakterystykę danej masy, jak i środowisko, w jakim ta masa została wytworzona lub przebywała. Z tego względu ilość substancji nieorganicznych, które w danych warunkach ulegają desorpcji zawsze będzie cechą charakterystyczną danej masy włóknistej. Obok właściwości i składu chemicznego samej masy włóknistej, ilość substancji przenikających z masy włóknistej do wody obiegowej w papierni może również zależeć od innych parametrów technologicznych panujących w ciągu technologicznym.

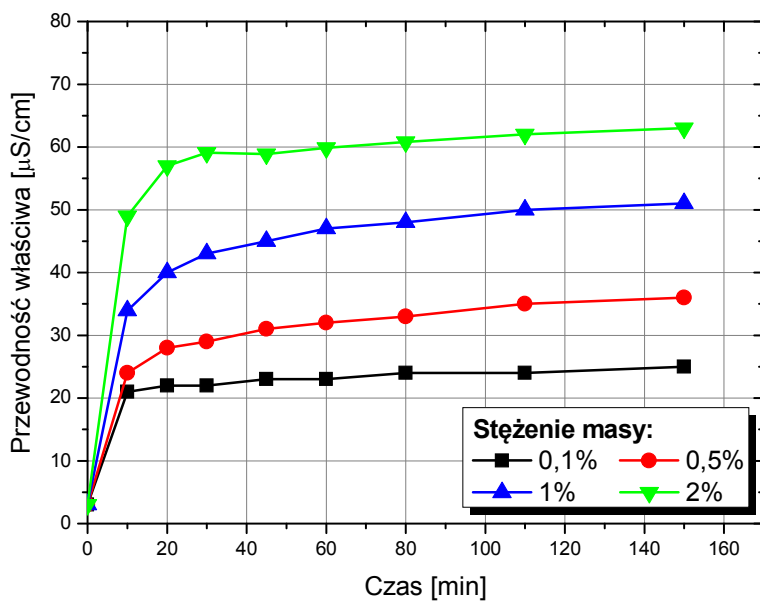
Jednym z tych parametrów jest temperatura wody obiegowej w układzie technologicznym maszyny papierniczej. Wpływ temperatury na omawiany wskaźnik pokazuje rysunek 4.5.2. Zastosowany zakres temperatur (z wyjątkiem temperatury 20°C) odpowiadał temperaturom, które można spotkać w procesie

produkcji papieru w warunkach przemysłowych. Wyniki wskazują, że temperatura jest czynnikiem, który intensyfikuje desorpcję nieorganicznych substancji rozpuszczalnych z mas włóknistych. Wraz ze wzrostem temperatury rosła wartość przewodności właściwej w układzie. Natomiast czas, po którym do cieczy przeniknęło 90% substancji, także w tym przypadku nie zależał od rodzaju masy włóknistej i wynosił ok. 45 minut.

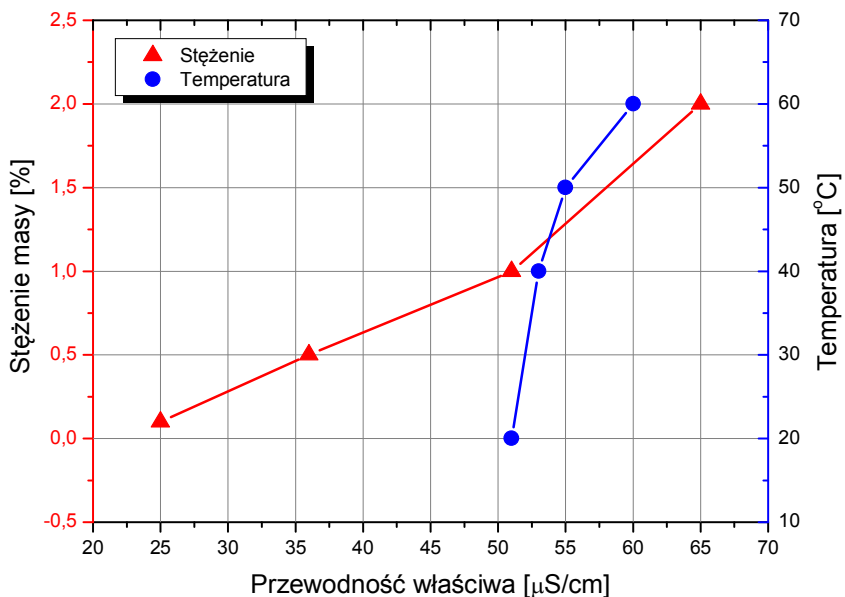
Na rysunku 4.5.3 pokazano zmiany przewodności właściwej wody w zależności od stężenia rozwłóknianej masy. Jako przykład zaprezentowano masę CTMP. Zakres stężeń zastosowany w niniejszych badaniach odpowiadał stężeniom panującym w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej. Uzyskane przebiegi kinetyki desorpcji wskazują, że wraz ze wzrostem stężenia ilość substancji nieorganicznych przenikających do wody także wzrastała. Natomiast stężenie rozwłóknianej masy nie miało wpływu zarówno na końcowy czas osiągnięcia stężenia równowagowego, jak i na czas t_{90} , które wynosiły odpowiednio: 140 minut i ok. 45 minut. Wyniki uzyskane dla innych mas również potwierdziły tę prawidłowość.



Rys. 4.5.2. Zmiany przewodności właściwej roztworu w zależności od temperatury masy włóknistej (na przykładzie masy CTMP. Stężenie = 1% = const)



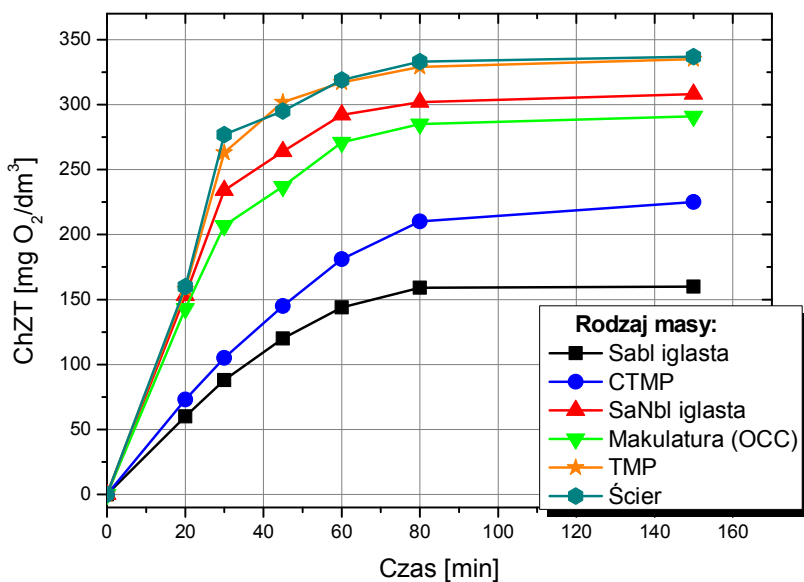
Rys. 4.5.3. Zmiany przewodności właściwej roztworu w zależności od stężenia masy włóknistej (na przykładzie masy CTMP, $T = 20^{\circ}\text{C}$)



Rys. 4.5.4. Porównanie wpływu stężenia i temperatury na osiągnięte graniczne wartości przewodności właściwej wody (na przykładzie masy CTMP)

Porównując wpływ temperatury rozwłókniania i stężenia rozwłóknianej masy (rys. 4.5.4), można stwierdzić, że oba procesy mają inną charakterystykę. Prezentowane wyniki wskazują, że w zakresie stężeń od 0,1 do 1% przyrost substancji nieorganicznych był praktycznie liniowy. Natomiast powyżej stężenia 1% nastąpiło zmniejszenie tempa przyrostu ogółu substancji nieorganicznych. W przypadku temperatury od 20°C do 40°C przyrost ilości substancji nieorganicznych był liniowy, zaś powyżej temperatury 40°C zaobserwowano wzrost intensywności wydzielania się ogółu substancji nieorganicznych.

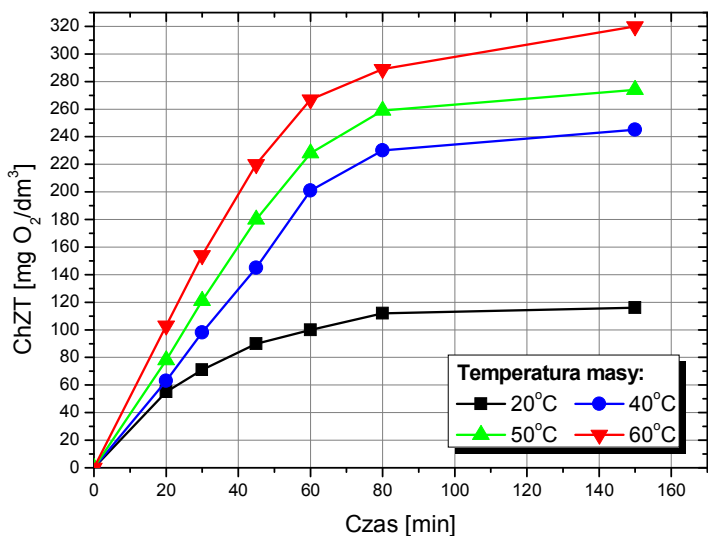
W trakcie prowadzenia procesu produkcyjnego do wód obiegowych wydzielają się również organiczne substancje rozpuszczalne. Na rysunku 4.5.5 przedstawiono zmiany wskaźnika ChZT na skutek desorpcji organicznych substancji rozpuszczalnych z różnych papierniczych mas włóknistych. Z wykresu tego wyznaczono czas t_{90} , który w tym przypadku wynosił ok. 70 minut. Był więc niemal dwukrotnie większy w porównaniu do wartości t_{90} uzyskanych dla desorpcji substancji nieorganicznych. Duży wpływ na ilość uwalnianych substancji organicznych miał rodzaj rozwłóknianej masy. Największe przyrosty ChZT (ok. 330 jednostek) stwierdzono dla ścieru oraz masy TMP. Nieco mniejsze wartości uzyskano dla masy SaNbl oraz masy makulaturowej (odpowiednio 300 i 280 jednostek). Najmniejsze zmiany wykazywały masy CTMP i Sabl.



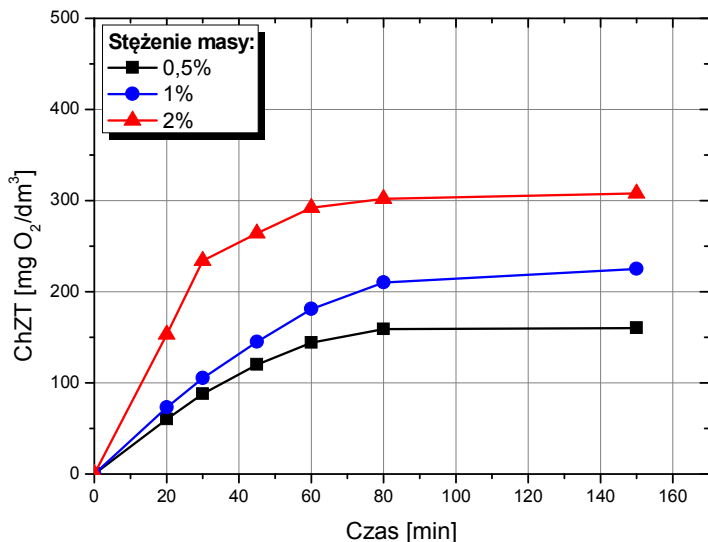
Rys. 4.5.5. Zmiany ChZT roztworu na skutek desorpcji organicznych substancji rozpuszczonych, zawartych w różnych papierniczych masach włóknistych (stężenie próbek = 1%, masy niemielone, T = 20°C)

Rysunek 4.5.6 przedstawia zmianę wskaźnika ChZT pod wpływem temperatury w trakcie rozwłókniania masy CTMP. Wyniki wykazały, że wzrost

temperatury powodował zwiększenie wartości wskaźnika ChZT, co jest równoznaczne ze zwiększoną ilością substancji organicznych, które przeniknęły do wody.



Rys. 4.5.6. Zmiany ChZT w roztworze w zależności od temperatury masy włóknistej (na przykładzie masy CTMP. Stężenie = 1% = const)



Rys. 4.5.7. Zmiany ChZT w roztworze w zależności od stężenia masy włóknistej (na przykładzie masy CTMP. Stężenie = 1%, T = 30°C)

Graniczny czas, po którym wskaźnik ChZT praktycznie się nie zmieniał wynosił ok. 80 minut, zaś czas t_{90} we wszystkich przypadkach wynosił ok. 70 minut.

Wpływ stężenia rozwłóknianej masy włóknistej na zmiany wskaźnika ChZT pokazano na rysunku 4.5.7. Wzrost stężenia znacząco zwiększał końcową wartość wskaźnika ChZT, co świadczy tym samym o większej ilości związków organicznych przenikających do wody. Dla omawianego przypadku wyznaczony czas t_{90} wynosił za każdym razem ok. 70 minut, można więc przyjąć, że stężenie nie ma wpływu na czas przebiegu desorpcji.

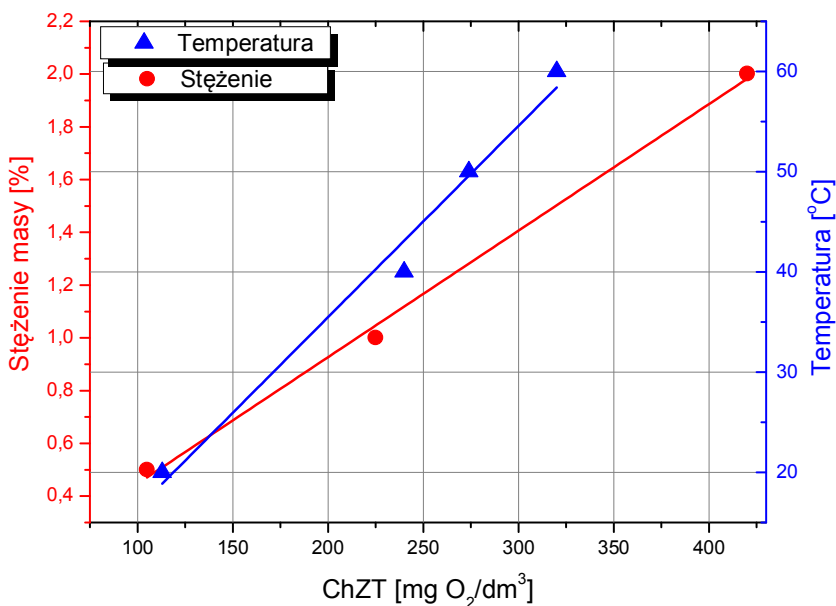
Porównanie charakterystyk oddziaływania temperatury rozwłókniania i stężenia rozwłóknianej masy na graniczną wartość wskaźnika ChZT (rys. 4.5.8) wskazuje, że w badanym zakresie oba te czynniki wpływają w sposób liniowy na zmianę ChZT.

Najważniejszym wnioskiem wynikającym z niniejszych badań jest to, że niezależnie od rodzaju masy włóknistej, czas desorpcji substancji rozpuszczalnych zawartych w tych masach nie jest zależny ani od rodzaju i stężenia masy włóknistej, ani od temperatury, w której prowadzony jest proces.

Na podstawie uzyskanych wyników założono, że najistotniejszym wskaźnikiem w przypadku budowy modelu matematycznego będzie czas t_{90} . Na podstawie tego parametru istnieje bowiem możliwość wyznaczenia ułamka całkowitej ilości substancji rozpuszczalnych, które przenikną do wody technologicznej w trakcie trwania procesu. W zależności więc od obliczonego czasu przebywania surowca włóknistego w układzie technologicznym ilość uwalnianych substancji rozpuszczalnych do wody technologicznej może być różna.

Warto nadmienić, że wiele, szczególnie starszych, zakładów przemysłowych w kraju posiada np. kadzie magazynowe obliczone na ponad 60 minut produkcji, a kadzie maszynowe projektowane na zapewnienie produkcji przez czas rzędu ok. 20 minut. Jeżeli jeszcze doliczy się do tego czas potrzebny na rozwłóknianie masy (ok. 20-30 minut), jest bardzo prawdopodobne, że czas t_{90} zostanie osiągnięty, a nawet przekroczony. Natomiast nowoczesne instalacje projektowane są w taki sposób, żeby czas przebywania surowca w układzie był możliwie zminimalizowany. W takich instalacjach do wody technologicznej uwolni się oczywiście odpowiednio mniej substancji rozpuszczalnych. Dlatego też znajomość czasu przebywania danego surowca w układzie technologicznym jest jednym z istotnych parametrów, które wpływają na stan równowagi fizykochemicznej w tym układzie.

Warto też zwrócić uwagę, że zarówno temperatura, jak i stężenie mają bardzo duży wpływ na ilość substancji przenikających do wody. W przypadku desorpcji substancji nieorganicznych wyraźnie widać, że temperatura jest czynnikiem, który szczególnie intensyfikuje wydzielanie się tych substancji do wody. Jest to niezwykle istotna informacja, bowiem jedną z konsekwencji ograniczania zużycia wody świeżej w fabrykach papieru jest nieunikniony wzrost temperatury wody obiegowej. Rosnąca temperatura będzie więc dodatkowo wpływała negatywnie na czystość tych wód.



Rys. 4.5.8. Porównanie wpływu stężenia i temperatury na osiągnięte graniczne wartości wskaźnika ChZT (na przykładzie masy CTMP)

W oparciu o powyższe wyniki uznano, że przyrost nieorganicznych i organicznych substancji rozpuszczalnych w modelowanym układzie technologicznym musi się opierać o znane wartości początkowe obu wykorzystanych wskaźników, jednakże końcowe stężenie można w pewnym stopniu skorygować w oparciu o wyznaczony czas t_{90} . Kinetykę narastania ilości tych substancji do czasu t_{90} (po przekroczeniu którego przyjęto, że desorpcja jest zakończona) opisano za pomocą równania empirycznego (4.9) o ogólnej postaci:

$$y = A + B * e^{-\frac{t}{K}} \quad (4.9)$$

Dla wybranej, użytej później w modelu matematycznym jako podstawowej, masy papierniczej Sabl wzór (4.9) przyjął następujące postaci:

– dla przewodności właściwej (EC):

$$EC = 60,647 - 269,53 * e^{-\frac{t}{6,477}} \quad (4.10)$$

– dla ChZT:

$$ChZT = 262,84 - 348,61 * e^{-\frac{t}{37,43}} \quad (4.11)$$

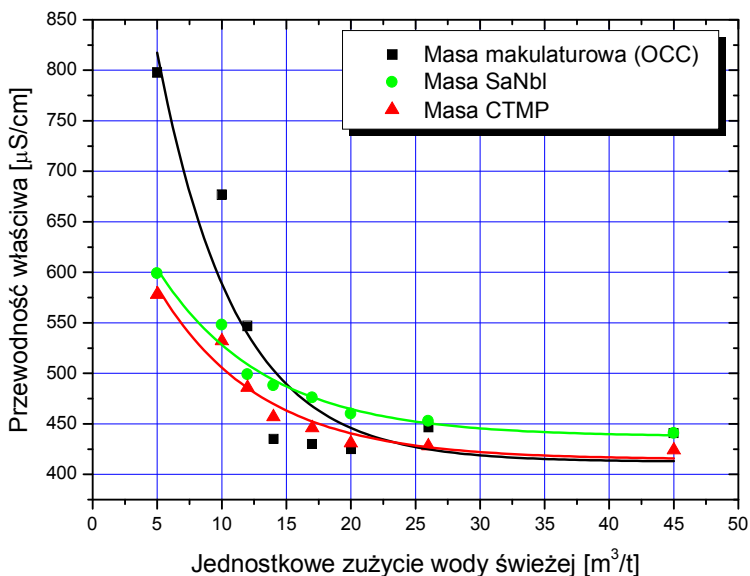
4.6. Wpływ jednostkowego zużycia wody świeżej na równowagę fizykochemiczną w maszynie papierniczej

Wzrost stężenia substancji rozpuszczonych w wodzie obiegowej jest nieuchronną konsekwencją zamknięcia obiegu wodnego maszyny papierniczej (Huhtamaki, 2003, Mittal et al., 2006, Przybysz et al., 1994). W ramach niniejszej pracy wykonano laboratoryjną analizę przyrostu ilości substancji rozpuszczalnych i nierozpuszczalnych na skutek ograniczania zużycia wody świeżej w modelowym układzie wodno-masowym procesu wytwarzania papieru. Proces obejmował takie operacje jednostkowe jak rozczynianie, rozwłóknianie i mielecie papierniczej masy włóknistej, z której następnie były formowane laboratoryjne próbki papieru, można więc przyjąć, że odpowiadał on całemu cyklowi produkcyjnemu, który odbywa się w papierni.

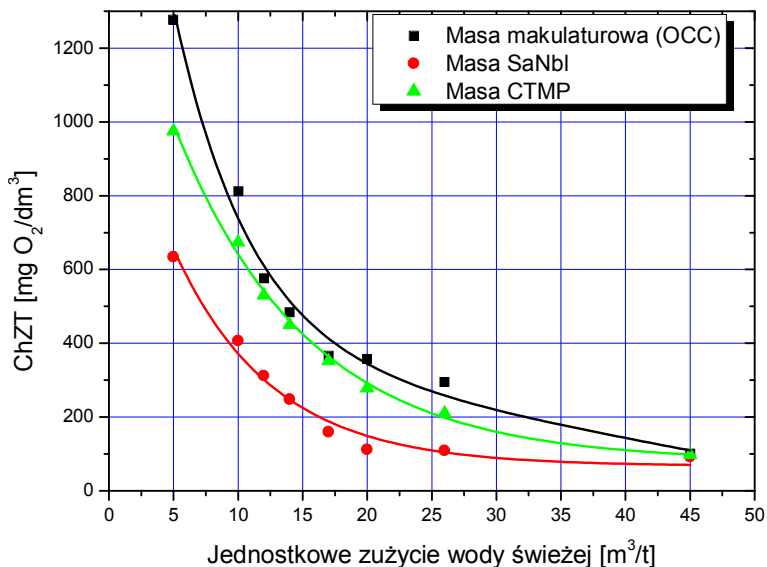
Woda z całego cyklu była ponownie zwracana do układu, dzięki czemu można było ograniczyć wykorzystanie wody świeżej. Woda świeża była dodawana wyłącznie w ilości odpowiadającej zakładanemu jednostkowemu zużyciu tego składnika. Zastosowano następujące wartości wskaźnika JZW: 45, 26, 20, 16, 13, 12, 10 i 5 m³/t. Badanymi wskaźnikami były: przewodność właściwa i ChZT.

Rysunek 4.6.1 przedstawia wpływ jednostkowego zużycia wody świeżej na przewodność właściwą wody z przerobu trzech, wybranych papierniczych mas włóknistych: masy makulaturowej uzyskanej na bazie makulatury biurowej, masy siarczanowej niebielonej sosnowej oraz masy CTMP. Uzyskane krzywe wskazują, że przyrost nieorganicznych substancji rozpuszczalnych posiada charakterystykę wykładniczą. Przebieg tej charakterystyki jest uzależniony od rodzaju masy włóknistej – w prezentowanym przypadku najwyższe wartości wskaźnika przewodności właściwej uzyskano dla masy makulaturowej, natomiast znacznie niższe wartości stwierdzono w przypadku masy SaNbl i CTMP.

Cechą charakterystyczną omawianego zjawiska jest to, że w początkowym etapie zmniejszania zużycia wody świeżej stężenie substancji rozpuszczalnych narasta powoli, jednakże od wartości JZW poniżej ok. 20 m³/t, następuje szybki przyrost stężenia tych substancji. Podobna sytuacja występuje w przypadku zmian ilości substancji organicznych pod wpływem zmniejszania jednostkowego zużycia wody świeżej, co pokazano na rys. 4.6.2.



Rys. 4.6.1. Wpływ jednostkowego zużycia wody świeżej na przewodność właściwą wody z przerobu różnych papirniczych mas włóknistych



Rys. 4.6.2. Wpływ jednostkowego zużycia wody świeżej na wskaźnik ChZT wody z przerobu różnych papirniczych mas włóknistych

Stwierdzono, że przedstawione wyżej krzywe dotyczące zmian przewodności właściwej i wskaźnika ChZT najlepiej można przybliżyć za pomocą tej samej

funkcji wykładniczej, która opisuje proces zmian zmętnienia wody obiegowej pod wpływem rosnącej ilości rozproszonych w niej cząstek stałych (zawiesiny).

Funkcja ta ma następującą postać ogólną (4.12):

$$y = y_0 + a * e^{\frac{-JZW}{b}} \quad (4.12)$$

Czynnik y_0 to wartość początkowa odpowiedniego wskaźnika charakterystycznego dla danej masy papierniczej. Stała „a” stanowi (łącznie z wartością y_0) teoretyczną, maksymalną wartość danego wskaźnika, która może zostać osiągnięta w danych warunkach przy jednostkowym zużyciu wody świeżej równym 0. Stała „b” jest wartością charakteryzującą indywidualne cechy układu technologicznego. Wartości poszczególnych współczynników dla trzech, wybranych mas włóknistych przedstawiono w tabeli 4.2.

We wszystkich omawianych przypadkach zastosowanie powyższej funkcji pozwoliło uzyskać stopień korelacji nie mniejszy niż 0,988, zaś dla niektórych mas wskaźnik wynosił nawet 0,995. Można więc uznać, że funkcja ta dobrze odzwierciedla przebieg zmian badanych równowag cząstkowych pod wpływem zmian jednostkowego zużycia wody świeżej.

Tabela 4.2. Współczynniki równania (4.12) dla badanych wskaźników i mas papierniczych

Rodzaj masy	Wskaźnik					
	Przewodność właściwa			ChZT		
	y_0	a	b	y_0	a	b
Masa makulaturowa (OCC)	412	929	6,01	136,0	2100	8,21
Masa SaNbl	437	302	8,31	66,2	1117	7,67
Masa CTMP	414	320	7,94	77,5	1469	10,36

5. MODEL UKŁADU WODNO-MASOWEGO MASZYNY PAPIERNICZEJ

Zastosowanie modelowania matematycznego i komputerowych symulatorów procesów produkcyjnych pozwala na skuteczne, bezpieczne, szybkie i tanie analizowanie i przewidywanie zjawisk zachodzących w systemach przemysłowych. W przypadku technologii papieru jest to szczególnie istotne, bowiem wraz ze wzrostem kapitału zaangażowanego w proces produkcyjny i wynikających z tego wzrostów wydajności procesu, wykonywanie niezbędnych prób i pomiarów w warunkach przemysłowych jest obecnie bardzo ograniczone, a wkrótce może być praktycznie niemożliwe. Dalszy rozwój i wszelkie działania optymalizacyjne w tym przemyśle coraz bardziej zaczynają więc zależeć od dokładności modeli matematycznych umożliwiających symulowanie określonych sytuacji bez konieczności ingerencji w układzie rzeczywistym.

Przegląd literatury naukowej wykazał, że modelowanie układu wodno-masowego maszyny papierniczej było przedmiotem prac badawczych szeregu naukowców. Prace z tego zakresu zaczęły pojawiać się już we wczesnych latach 60., kiedy to Beecher (1963) pokazał możliwości dynamicznego modelowania procesów papierniczych na przykładzie prostego modelu fragmentu maszyny papierniczej obejmującego dopływ masy gęstej, pompę wlewu, wlew i sekcję sitową maszyny papierniczej. Dalsze prace z tego zakresu prowadził m.in. Mardon et al. (1972), który zaproponował model układu wodno-masowego maszyny papierniczej oparty o bilans materiałowy. Model ten, pomimo swej prostoty, dawał dość zadowalające rezultaty. Prawdziwy rozwój modelowania procesów papierniczych przypadł jednak na lata 90. XX wieku, a zwłaszcza na początek XXI wieku, w wyniku upowszechnienia się i wzrostu mocy obliczeniowej komputerów. Yap et al. (2001) wykonał dynamiczny model końca „mokrego” maszyny papierniczej, która produkowała papier wykorzystując kilka mas papierniczych. W modelu tym uwzględniono model retencji masy na sicie, a także podjęto próbę modelowania właściwości produkowanego papieru, w tym przypadku jego białości. Natomiast Noël et al. (1993) wykorzystał możliwości symulacji komputerowych do badań nad konsekwencjami ograniczania zużycia wody świeżej w układzie maszyny papierniczej. Podobną tematykę badań podjął Orcotoma et al. (1999), który uwzględnił zjawisko narastania frakcji drobnej oraz substancji rozpuszczonych w układzie wodno-masowym papierni na skutek ograniczania zużycia wody świeżej. Natomiast Ravnjak et al. (2004) w swym modelu układu wziął pod uwagę bilans organicznych substancji rozpuszczonych oznaczanych za pomocą wskaźnika ChZT. Problemem modelowania skutków zmniejszania zużycia wody świeżej w produkcji papieru zajmował się także Miranda et al. (2009). W pracy tej autorzy wzięli pod uwagę szereg konkretnych związków chemicznych, które mogą być obecne w wodach technologicznych papierni, natomiast zbudowany przez nich model był bardziej ogólny i nie dotyczył układu technologicznego żadnej papierni. O możliwościach tkwiących

w modelach opartych na równaniach bilansu materiałowego świadczą także prace Barber i Scott (2007) oraz Yeong-Koo et al. (2004). Zaproponowany w tej pracy model pozwalał opisać przebieg zmian stężenia zarówno frakcji włóknistej, jak i wypełniacza w wodach technologicznych modelowanego układu sekcji mokrej. Porównanie uzyskanych wyników z danymi doświadczalnymi potwierdziło skuteczność modelowania w oparciu o równania bilansowe. Przegląd literatury dotyczącej dynamicznego modelowania procesu produkcji papieru (zwłaszcza układu wodno-masowego maszyny papierniczej) pokazuje, że wielu autorów nie wspomina o zastosowaniu układów automatycznej kontroli procesu. Współczesna produkcja papieru bez układów automatyki nie jest możliwa, dlatego są one powszechnie stosowane. Trzeba więc uwzględnić fakt, że układy te mogą mieć wpływ na równowagę technologiczną w procesie produkcyjnym. Dlatego też wiele istotnych parametrów w układzie technologicznym maszyny papierniczej będzie przyjmować różne wartości w zależności od funkcjonowania zastosowanych układów kontroli procesu.

Jedną z nielicznych prac, w której uwzględniono układy kontroli procesu, jest praca Yli-Fossi et al. (2002, 2004). W pracy tej stworzono model układu maszyny papierniczej na bazie bilansu masowego, ale z uwzględnieniem podstawowych układów automatyki. Jest to niezwykle istotne, bowiem jak już wspomniano, przebieg rzeczywistego procesu produkcyjnego jest obecnie ściśle związany z pracą układów automatycznej kontroli. Warto też wspomnieć, że nie ma żadnych doniesień literaturowych dotyczących kompleksowego modelu obejmującego równowagę cząstkową z jednoczesnym uwzględnieniem zmian zdolności ruchowej maszyny papierniczej i jakości produkowanego papieru. Dodatkowym potwierdzeniem ogólnych trudności w modelowaniu procesów papierniczych jest fakt, że niemal każdy model jest wspierany równaniami empirycznymi (Orccotoma et al., 1999, Paulapuro, 2008, Yli-Fossi et al., 2004).

Na podstawie powyższych rozważań podjęto decyzję o stworzeniu dynamicznego modelu układu wodno-masowego oraz sekcji „mokrej” maszyny papierniczej, a następnie całego programu komputerowego pozwalającego na analizę pracy tego fragmentu ciągu technologicznego. Na bazie przemyśleń własnych oraz danych literaturowych uznano, że najbardziej interesujący będzie model obejmujący równowagę wodną, masową i fizykochemiczną.

Do najważniejszych cech, które odróżniają tworzony symulator od dostępnych obecnie produktów tego typu należą:

- uwzględnienie 7 różnych parametrów określających właściwości surowca włóknistego,
- uwzględnienie dynamicznych zmian właściwości surowca pod wpływem pracy układu technologicznego,
- uwzględnienie parametrów końcowych produktu za pomocą 5 różnych wskaźników,

- uwzględnienie dynamicznych zmian parametrów pracy układu technologicznego pod wpływem zmian właściwości produktu.

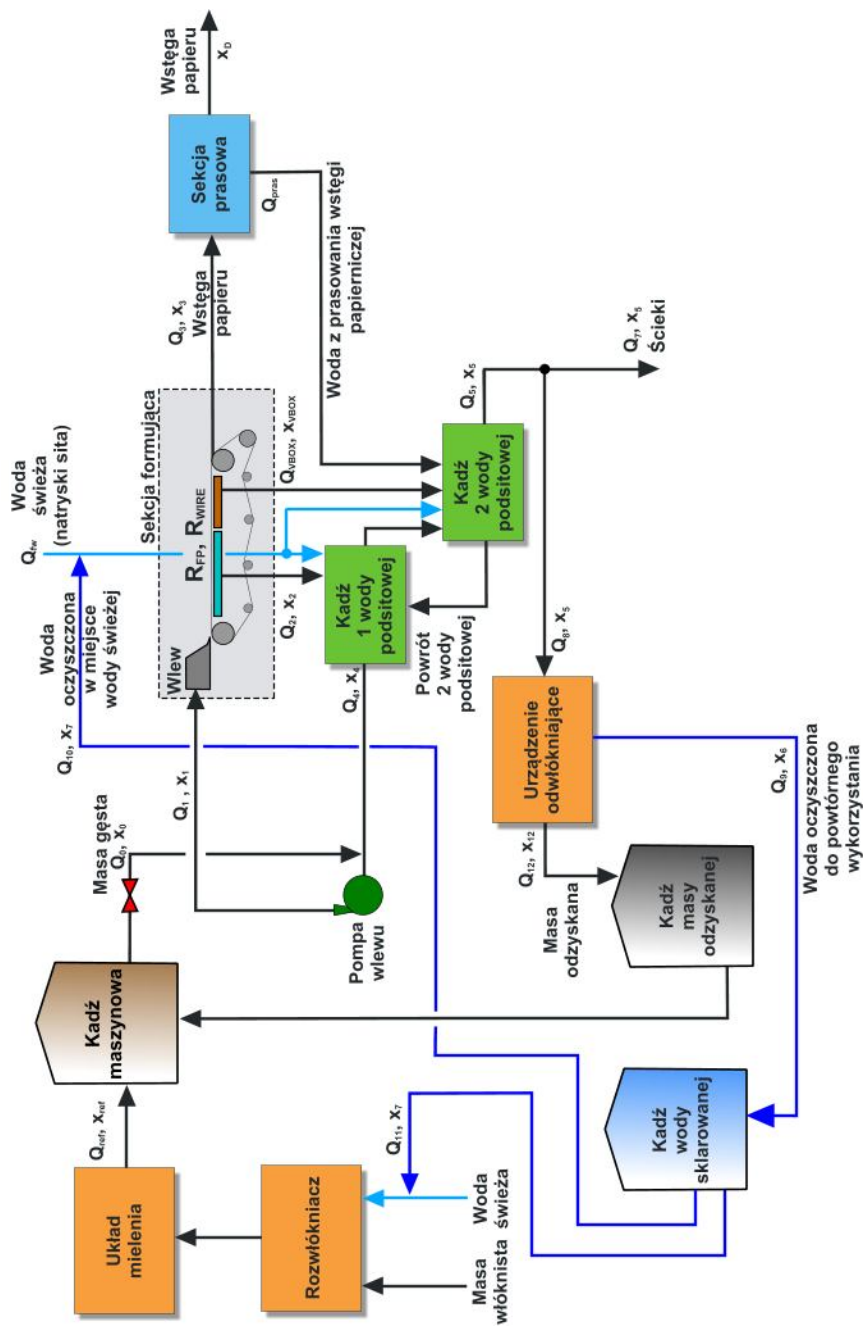
5.1. Założenia wstępne, wybór narzędzi i ogólna budowa modelu

W początkowej fazie tworzenia modelu i symulatora wykonano ogólne założenia początkowe:

- model będzie oparty na bilansie materiałowym masy z uwzględnieniem frakcji drobnej oraz organicznych i nieorganicznych substancji rozpuszczonych (charakteryzowanych wskaźnikami ChZT i TDS),
- obliczenia będą oparte o dostępne lub łatwe do oznaczenia wskaźniki technologiczne (możliwość zastosowania równań empirycznych),
- symulator będzie wyposażony w podstawowe układy sterowania automatycznego, funkcjonalnie zbliżone do układów stosowanych w procesach rzeczywistych,
- praca w programie powinna przypominać pracę przy obsłudze rzeczywistego układu technologicznego,
- program symulacyjny powinien posiadać interfejs przypominający rzeczywisty system sterowania maszyny papierniczej DCS.

Przed rozpoczęciem właściwych prac przeanalizowano szereg dostępnych narzędzi, które potencjalnie mogłyby posłużyć do sporządzenia modelu i całego symulatora. Aktualnie na rynku występuje wiele tego typu produktów. Szereg firm oferuje komercyjne, specjalistyczne programy do symulacji wybranych procesów przemysłowych (dla procesów papierniczych może to być np. APROS, IDEAS, WinGEMS). Programy te wyposażone są w standardowe biblioteki obliczeniowe, a także graficzny interfejs użytkownika zbliżony do systemów typu CAD, co umożliwia łatwe i szybkie skonstruowanie układu połączeń całego ciągu technologicznego. Wadą tego typu rozwiązań jest brak dostępu do kodu źródłowego, co może istotnie ograniczać możliwości symulatora w przypadku sytuacji nietypowych.

Innym rozwiązaniem jest zastosowanie programów symulacyjnych lub środowisk obliczeniowych ogólnego przeznaczenia (np. MathCAD, SIMULINK, Modellica), w których można wszystko zaprojektować od podstaw. Jeszcze innym rozwiązaniem, które choć czasochłonne, to jest wciąż często wykorzystywane w badaniach związanych z symulacją procesów przemysłowych i które daje najwięcej swobody, jest zastosowanie procedur numerycznych i tradycyjnych języków programowania. Potwierdza to wielu naukowców (m.in. Pontremoli, 2000, Petera, 2001), którzy jednocześnie wskazują, że największą zaletą dostępu do kodu źródłowego jest możliwość łatwego i praktycznie nieograniczonego modyfikowania modelu i dostosowywania go do aktualnych potrzeb.

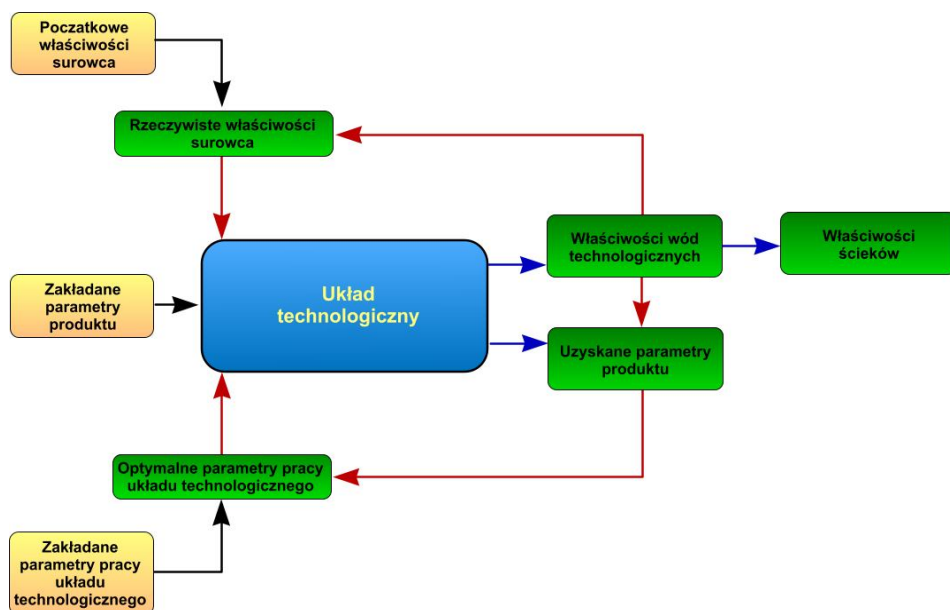


Rys. 5.1.1. Schemat blokowy modelowanego ciągu technologicznego (układ wodno-masowy)

W oparciu o powyższe rozważania zdecydowano się na zastosowanie tej ostatniej metody. Ponieważ symulator miał pracować w systemie Windows, do jego budowy wykorzystano język Framework Pascal dla Windows oraz standardowe biblioteki WinAPI. Natomiast wszelkie procedury i funkcje obliczeniowe, jak również te dotyczące samego interfejsu użytkownika, zostały opracowane samodzielnie. Wyjściowym układem technologicznym dla opracowywanego modelu był układ wodno-masowy płaskositowej maszyny papierniczej pracującej w jednej z polskich papierni. Rys. 5.1.1 przedstawia uproszczony schemat blokowy tego układu.

Wykonany model obejmuje fragment ciągu przygotowania masy (operację jednostkową mielenia masy papierniczej) oraz układ wodno-masowy maszyny papierniczej uwzględniający sekcję formującą i prasową. Ponadto drugi obieg wodny zawiera uproszczony model filtra tarczowego pozwalający na oczyszczanie nadmiaru wody z pierwszego obiegu wodnego.

Ogólna struktura funkcjonowania opracowanego modelu (i programu symulacyjnego) została przedstawiona na rys. 5.1.2.



Rys. 5.1.2. Ogólna struktura pracy opracowanego modelu

Parametry wejściowe modelu można podzielić na trzy główne grupy:

- właściwości surowca,
- zakładane parametry produktu,
- zakładane parametry pracy układu technologicznego.

W modelu surowiec stanowi układ składający się z 5 głównych składników: wody, frakcji włóknistej, frakcji drobnej, nieorganicznych substancji rozpuszczalnych i organicznych substancji rozpuszczalnych. Do jego opisu zastosowano 7 parametrów określających poszczególne właściwości. Parametry jednoznacznie definiujące ten układ to: ułamek masowy zawartości suchej substancji w masie, zawartość frakcji drobnej w masie, smarność (odwadnialność), WRV włókien, WRV frakcji drobnej, ładunek organicznych substancji rozpuszczalnych charakteryzowany zmianą wskaźnika ChZT i ładunek nieorganicznych substancji rozpuszczalnych charakteryzowany zmianą przewodności właściwej. Najprościej można to wyrazić za pomocą zapisu wektorowego (5.1):

$$\overline{m}_{pulp} = \begin{bmatrix} x_{in} \\ x_{fr} \\ SR \\ WRV_w \\ WRV_{fr} \\ ChZT \\ TDS \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Powyższe parametry początkowe są funkcjami różnych zmiennych występujących w procesie. Przed dotarciem masy do samej maszyny papierniczej początkowe właściwości tej masy ulegają określonym zmianom wynikającym z konfiguracji układu technologicznego, jego parametrów pracy oraz zmian we właściwościach strumieni wód technologicznych wprowadzanych do masy papierniczej (patrz rys. 4.1.2). W modelu zmiany te przedstawiono za pomocą obliczeń bilansowych i opracowanych samodzielnie równań empirycznych (przedstawionych we wcześniejszych rozdziałach). W efekcie do maszyny papierniczej dociera masa papiernicza, której właściwości można ogólnie wyrazić za pomocą określonych funkcji odpowiednich zmiennych procesowych zapisanych w formie równania (5.2):

$$\overline{m}_{pulp} = \begin{bmatrix} x_{in} = f(Q_4, A) \\ x_{fr} = f(SEC, Q_4, R_{fp}) \\ SR = f(x_{fr}) \\ WRV_w = f(SEC) \\ WRV_{fr} = f(SEC) \\ ChZT = f(t_{90}) \\ TDS = f(t_{90}) \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Drugim parametrem wejściowym są zakładane właściwości produktu. Wskaźniki te stanowią granice poprawnej pracy modelu. Zastosowano tutaj 5 parametrów: gramaturę produkowanego papieru, suchość końcową, zawartość

frakcji drobnej zatrzymanej w formowanej wstędze papieru oraz wytrzymałość tej wstęgi na zerwanie w kierunku CD i MD. Ogólnie wyrażono to w równaniu (5.3):

$$\overline{m}_{pap} = \begin{bmatrix} g_r \\ s_K \\ x_{fr} \\ sm_{CD} \\ sm_{MD} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Jednym z wyników działania modelu jest obliczanie przewidywanych właściwości produktu. Podobnie jak w przypadku surowca, właściwości te wynikają z właściwości masy papierniczej oraz parametrów pracy układu technologicznego. Poprzez porównanie z wartościami zakładanymi uzyskuje się kluczową informację o poprawności przebiegu procesu.

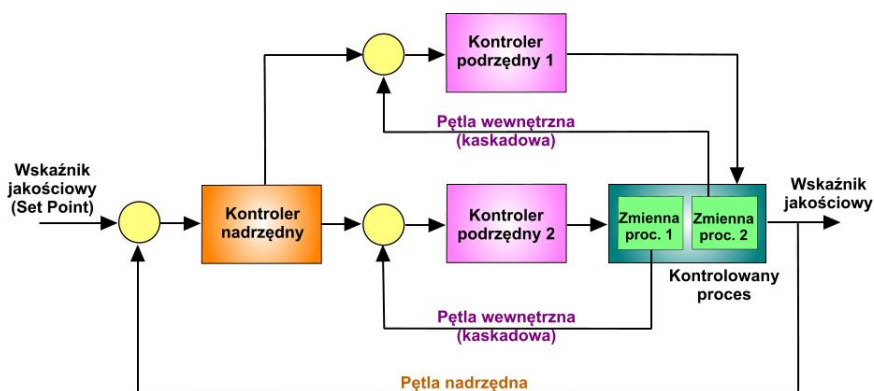
Kolejną grupą wskaźników, które wyznaczają granice modelu, są zakładane parametry pracy układu technologicznego. Ze względu na ich dużą liczbę oraz fakt występowania w różnych punktach pracy modelowanego układu, parametrów tych nie wyrażono za pomocą zapisu wektorowego, natomiast przedstawiono je zbiorczo w tabeli 5.1. Parametry te można dodatkowo przyporządkować do dwóch głównych podgrup. Pierwszą podgrupę stanowią parametry fizyczne układu. Drugą podgrupę stanowią wskaźniki technologiczne określające sposób pracy modelowanego układu. Warto podkreślić, że dodatkowo szereg wskaźników technologicznych może w trakcie trwania procesu ulegać zmianie pod wpływem innych parametrów (np. prędkość maszyny papierniczej może być obniżona w przypadku ograniczonej odwadnialności wstęgi papierniczej).

Fakt ten stanowi istotne rozszerzenie w aspekcie modelowania procesów związanych z pracą sekcji „mokrej” maszyny papierniczej i odróżnia tworzony symulator od innych narzędzi tego typu. W stworzonym modelu uwzględniono bowiem zarówno zwrotny wpływ właściwości produktu na parametry pracy układu technologicznego (wyliczane przez układy automatycznej regulacji) oraz wsteczny wpływ parametrów pracy układu technologicznego na właściwości wejściowe surowca. Wpływ właściwości masy papierniczej i parametrów pracy procesu na wydajność tego procesu określono mianem tzw. zdolności ruchowej maszyny papierniczej. Model ten w istocie wyznacza w sposób dynamiczny wartości graniczne trwającego procesu. Wykroczenie poza te wartości oznacza oczywiście, że symulowany proces w warunkach rzeczywistych nie mógłby prawidłowo funkcjonować.

Tabela 5.1. Najważniejsze parametry pracy modelowanego układu technologicznego

Grupa	Parametr
Parametry fizyczne maszyny papierniczej i układu wodno-masowego	Szerokość sita
	Geometria szczeliny wypływowej wlewu
	Objętość kadzi I wody podsitowej
	Objętość kadzi II wody podsitowej
	Objętość układu „pompa wlewu-wlew”
Parametry technologiczne maszyny papierniczej i układu wodno-masowego	Objętość układu „zawór masy gęstej-pompa wlewu”
	Prędkość maszyny papierniczej
	Retencja pierwszego przejścia
	Całkowita retencja na sicie
	Retencja pierwszego przejścia frakcji włóknistej w strefie rejestrowej
	Retencja pierwszego przejścia frakcji włóknistej w strefie skrzynek ssących
	Współczynnik wyprzedzenia sita
	Natężenie przepływu masy gęstej
	Natężenie przepływu masy rozcieńczonej do wlewu
	Natężenie przepływu wody świeżej
	Natężenie przepływu przez pompę wlewu
Jednostkowe obciążenie młynów energią efektywną	
Efektywność odwłókniania w II obiegu wodnym	

Samodzielna modyfikacja parametrów pracy modelu nie jest możliwa bez odpowiednich układów automatyki. Do regulacji najważniejszych parametrów procesu zastosowano model regulacji kaskadowej, który jest powszechnie wykorzystywany w układach sterowania maszyn papierniczych (Leiviska, 1999, Wang et al., 1997). Model ten w najprostszej postaci polega na proporcjonalnym wyznaczaniu uchybu regulacji dla kilku regulatorów lokalnych jednocześnie (rys. 5.1.3).



Rys. 5.1.3. Ogólny schemat zastosowanej w modelu regulacji kaskadowej

Regulatory lokalne zostały wyposażone w algorytm PID realizowany zgodnie z klasycznym równaniem (5.4):

$$PID = K_p \cdot e_p + K_I \cdot \int_0^t (e_i) dt + K_d \cdot \frac{de_D}{dt} \quad (5.4)$$

Każdy z regulatorów posiada możliwość indywidualnego ustawienia poszczególnych współczynników wzmocnienia. W tabeli 5.2 przedstawiono zastosowane pętle regulacyjne, natomiast tabela 5.3 pokazuje zależności między poszczególnymi regulatorami nadrzędnymi i związanymi z nimi regulatorami podrzędnymi. Wszystkie pętle odpowiadają realnym układom automatyki stosowanym w maszynach papierniczych.

Tabela 5.2. Zastosowane pętle regulacyjne

Nazwa kontrolowanego parametru	Możliwe tryby pracy regulatora
Przepływ masy gęstej przez zawór gramatury (zawór, za pomocą którego reguluje się gramaturę produkowanego papieru)	Lokalny/Podrzędny
Przepływ masy rozcieńczonej przez pompę wlewu	Lokalny/Podrzędny
Regulacja przepływu wody świeżej	Lokalny
Regulacja ciśnienia we wlewie	Nadrzędny/Podrzędny
Regulacja gramatury	Nadrzędny
Regulacja stężenia we wlewie	Nadrzędny/Podrzędny
Regulacja współczynnika wyprzedzenia sita	Nadrzędny
Regulacja prędkości	Nadrzędny/Podrzędny
Optymalizacja prędkości	Nadrzędny

Tabela 5.3. Nadrzędne pętle regulacji i odpowiadające im pętle podrzędne

Nazwa nadrzędnej pętli regulacji	Powiązane regulatory podrzędne
Regulacja ciśnienia we wlewie	<ul style="list-style-type: none"> • Przepływ masy rozcieńczonej przez pompę wlewu • Regulacja stężenia we wlewie
Regulacja gramatury	<ul style="list-style-type: none"> • Przepływ masy gęstej przez zawór gramatury • Regulacja ciśnienia we wlewie • Regulacja stężenia we wlewie
Regulacja stężenia we wlewie	<ul style="list-style-type: none"> • Przepływ masy rozcieńczonej przez pompę wlewu • Regulacja gramatury
Regulacja współczynnika wyprzedzenia sita	<ul style="list-style-type: none"> • Regulacja ciśnienia we wlewie • Regulacja stężenia we wlewie
Regulacja prędkości	<ul style="list-style-type: none"> • Regulacja współczynnika wyprzedzenia sita • Przepływ masy gęstej przez zawór gramatury
Optymalizacja prędkości	<ul style="list-style-type: none"> • Regulacja prędkości

Model przepływu i rozdziału strumieni masy (zarówno substancji stałych, jak i rozpuszczonych) pomiędzy poszczególnymi obiektami zrealizowano drogą obliczeń bilansowych przy założeniu idealnego mieszania w obiektach o niezerowej objętości. Do obiektów tych zaliczane są wszystkie zbiorniki (kadzie I i II wody podsitowej, kadź maszynowa) i wlew maszyny papierniczej. Założono również, że w rurociągach występuje przepływ tłokowy cieczy nieściśliwej (co jest dopuszczalne przy uwzględnieniu występujących w badanym układzie stężeń, gdzie najczęściej ponad 90% ogólnej objętości stanowi woda). Opóźnienia przepływu w rurociągach zrealizowano poprzez tablice wektorowe, w których dane są cyklicznie przesuwane w czasie symulacji, przy czym długość przesunięcia jest proporcjonalna do ilorazu objętości danego elementu i objętościowego natężenia przepływu, co pozwala na obliczenie czasu opóźnienia. Takie rozwiązanie pozwala też na dodatkowe uwzględnianie efektów niewielkich zmian stężenia w płynącym medium.

Dla ułatwienia opisu matematycznego modelowanego układu technologicznego podzielono go na trzy podstawowe bloki: blok pierwszy obejmuje układ przygotowania masy papierniczej wraz z układem doprowadzenia tej masy do maszyny papierniczej, blok drugi – sekcję „mokrą” maszyny papierniczej (czyli sekcje: formującą i prasową) wraz z I obiegiem wodnym, zaś blok trzeci – II obieg wodny wraz z układem odwłókniania wody technologicznej.

5.2. Bilans wodno-masowy przygotowania masy papierniczej i doprowadzenia masy do maszyny papierniczej

W układzie przygotowania masy papierniczej odbywa się wspomniany już proces mielenia, skutkiem czego następuje modyfikacja początkowych właściwości tej masy. Ilość frakcji drobnej i smarność masy, zgodnie z przedstawionymi wcześniej równaniami (4.1), (4.2) i (4.3), wzrasta w zależności od zużycia jednostkowej energii mielenia. Następuje zmiana stopnia spęcznienia włókien i frakcji drobnej zgodnie z równaniami (4.5) oraz (4.6), a co za tym idzie wzrastają wskaźniki wytrzymałościowe papieru, który jest produkowany z tej masy. Zużycie jednostkowej energii mielenia jest więc ściśle uzależnione od zakładanych parametrów użytkowych produktu.

Po procesie mielenia strumień zmielonej masy papierniczej (Q_{ref}) o określonym stężeniu jest podawany do kadzi maszynowej. Do tej kadzi jest również kierowany strumień masy odzyskanej z II obiegu wodnego (Q_{12}). Założono, że 100% suchej masy tego strumienia stanowi frakcja drobna. Ogólny bilans wodno-masowy kadzi maszynowej przedstawia się więc następująco:

$$\rho_{km} V_{km} \frac{dx_{km}}{dt} = \rho_{ref} Q_{ref} x_{ref} + \rho_{12} Q_{12} x_{12} - \rho_0 Q_0 x_0 \quad (5.5)$$

W uwzględnianym zakresie stężeń wszystkie gęstości przyjęto za równe.

W trakcie trwania procesu w kadzi tej mogą okresowo występować wahania ilości masy papierniczej zgodne z równaniem (5.6):

$$\text{dla } 0 < V_{km} \leq V_{km(\max)} \quad \frac{dV_{km}}{dt} = Q_{ref} + Q_{12} - Q_0 \quad (5.6)$$

Z kadzi maszynowej strumień masy papierniczej (Q_0) jest przekazywany do układu rozcieńczania usytuowanego bezpośrednio przy maszynie papierniczej. Samo rozcieńczanie jest realizowane w pompie wlewu, która zawraca i wodę obiegową (Q_4) do urządzenia wlewowego. Do króćca ssącego tej pompy jest przyłączony wylot rurociągu masy gęstej. Bilans masowy układu pompa wlewu – wlew przedstawiono w postaci równań (5.7) i (5.8):

$$m_1 = \rho_1 Q_1 x_1 = \rho_4 Q_4 x_4 + \rho_0 Q_0 x_0 \quad (5.7)$$

$$Q_1 = Q_4 + Q_0 \quad (5.8)$$

Również tutaj przyjęto, że wszystkie gęstości były równe. Znajomość całkowitego natężenia strumienia masy dostarczanej do wlewu pozwala obliczyć tzw. współczynnik wyprzedzenia sita (EFFLUX) wyrażony równaniem (5.9). Wskaźnik ten decyduje o parametrach wytrzymałościowych papieru w kierunku CD i MD i w układach rzeczywistych musi być utrzymywany na poziomie określonym technologią produkcji (wymaganiami właściwości wytrzymałościowych produktu):

$$EFFLUX = \frac{Q_1}{A \cdot v_s} \quad (5.9)$$

Znajomość ilości masy opuszczającej wlew pozwala – przy znanej retencji na sicie (R_{wire}) i parametrach maszyny papierniczej (prędkości v_s i szerokości formowanej wstęgi papierniczej b_w) – na wyliczenie gramatury produkowanego papieru oraz wydajności maszyny papierniczej:

$$g_r = \frac{m_1 \cdot R_{wire}}{v_s \cdot b_w} \quad (5.10)$$

$$P_{MP} = g_r \cdot b_w \cdot v_s \cdot s_K \quad (5.11)$$

We wszystkich obliczeniach wskaźniki retencji miały postać ułamka dziesiętnego.

5.3. Bilans wodno-masowy sekcji „mokrej” maszyny papierniczej

Rozcieńczona masa papiernicza doprowadzana jest do wlewu maszyny papierniczej. Zadaniem wlewu jest równomierne rozprowadzenie strumienia masy papierniczej na całej szerokości sita formera. W celu uzyskania pożądanych właściwości produktu konieczne jest również utrzymanie określonego tzw.

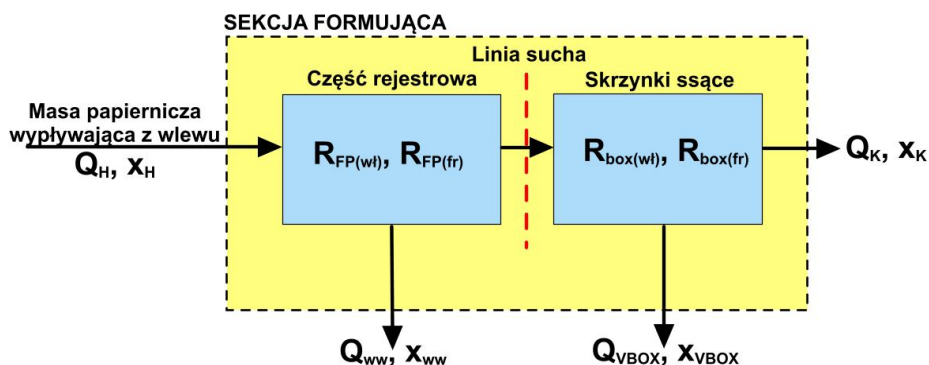
współczynnika wyprzedzenia sita, czyli stosunku prędkości liniowej strumienia masy papierniczej do prędkości liniowej sita.

W opisywanej pracy zastosowano model wlewu hydraulicznego opisanego m.in. przez Kikiewicza (1986). Model ten ogólnie można opisać następującym równaniem (5.12):

$$p_{HBX} = \left(\frac{EFFLUX}{\varphi} \right)^2 \cdot \frac{v_n^2 \cdot \rho}{2} \quad (5.12)$$

Powyższy wzór jest wykorzystywany przede wszystkim w układzie automatycznej regulacji ciśnienia we wlewie do obliczeń wymaganego natężenia przepływu dla pompy wlewu w celu utrzymania zadanego współczynnika wyprzedzenia sita.

Jedną z najważniejszych operacji jednostkowych, które determinują rozdział strumieni wody i masy w układzie technologicznym maszyny papierniczej jest proces formowania wstęgi papieru w sekcji formującej. Rozważając więc proces formowania wstęgi papierniczej pod kątem gospodarki wodno-masowej maszyny papierniczej należy zauważyć, że w trakcie tej operacji jednostkowej można wyróżnić dwie główne strefy formowania (i odwadniania), w których następuje rozdział strumieni wody i substancji stałych (rys. 5.3.1). Pierwsza strefa obejmuje sito formujące od szczeliny wypływowej wlewu do początku skrzynek ssących. W wyniku oddziaływania statycznych elementów odwadniających (odpowiednio wyprofilowanych listew umieszczonych pod sitem) następuje w tej strefie odprowadzanie wody i zagęszczanie struktury wstęgi papierniczej zgodnie z wymaganą krzywą odwadniania i turbulencji (Eames, 2009, Gavelin, 1998, Kawka et al., 1979).



Rys. 5.3.1. Schemat rozdziału strumieni wody i masy na sicie formera maszyny papierniczej

Woda, która wraz z częścią cząstek stałych masy papierniczej została usunięta w pierwszej strefie, jest określana mianem I wody podsitowej i krąży

w I obiegu wodnym. Rozdział strumienia substancji stałych w tej strefie jest definiowany wskaźnikiem retencji pierwszego przejścia (R_{fp}). Na końcu tej strefy odwadniania zaczyna pojawiać się w formowanej wstędze papieru tzw. linia sucha. Jest to charakterystyczny, doskonale widoczny obszar formowanej wstęgi papieru, gdzie górna warstwa włókien zaczyna wystawać ponad warstwą wody. Na linii suchej w przestrzeniach (porach) w strukturze wstęgi woda zaczyna być zastępowana przez powietrze. Suchość wstęgi papieru na linii suchej osiąga wartość ok. 6%.

Druga strefa odwadniania obejmuje więc skrzynki ssące i wał wyzymaka. Usuwanie wody w tej strefie odbywa się poprzez zastosowanie podciśnienia. Woda odprowadzana ze skrzynek ssących trafia do II wody podsitowej. Rozdział strumienia substancji stałych w tej strefie można zdefiniować za pomocą pomocniczej retencji R_{BOX} , gdzie:

$$R_{box} = \frac{R_{wire}}{R_{fp}} \quad (5.13)$$

Z punktu widzenia równowagi masowej najbardziej interesująca jest ilość cząstek frakcji drobnej przenikających przez sito, dlatego konieczna jest znajomość retencji poszczególnych składników masy papierniczej rozdzielanych w różnych strefach sekcji formującej.

Zgodnie z wcześniejszymi założeniami masa papiernicza jest rozważana jako układ dwuskładnikowy, zawierający frakcję włóknistą i frakcję drobną. Dla strumienia części stałej w masie papierniczej doprowadzanej do sekcji formującej można to wyrazić za pomocą równania (5.14):

$$\rho_H Q_H x_H = \rho_H Q_{H(wł)} x_{H(wł)} + \rho_H Q_{H(fr)} x_{H(fr)} \quad (5.14)$$

Po uwzględnieniu retencji pierwszego przejścia dla obu frakcji ilość suchej masy opuszczająca pierwszą strefę formowania będzie równa (równanie 5.15):

$$x_H R_{fp} = Q_{H(wł)} x_{H(wł)} R_{fp(wł)} + Q_{H(fr)} x_{H(fr)} R_{fp(fr)} \quad (5.15)$$

Rozwiązując powyższe równanie względem retencji frakcji drobnej, otrzymuje się następujące równanie (5.16):

$$R_{fp(fr)} = \frac{R_{fp} - R_{fp(wł)}(1 - x_{H(fr)})}{x_{H(fr)}} \quad (5.16)$$

Równanie (5.16) umożliwia określenie rozdziału frakcji drobnej na sicie formera maszyny papierniczej, co pozwala następnie obliczyć ilość frakcji drobnej krążącej w wodach obiegowych maszyny papierniczej, a także ilość frakcji drobnej zawracanej do masy papierniczej. Może to stanowić podstawę do oszacowania zmiany zdolności do odwadniania masy papierniczej, co bezpośrednio przekłada się na zdolność ruchową maszyny papierniczej.

Przykładowo, dla pierwszej strefy formowania (części rejestrowej) bilans wodno-masowy będzie wyglądał następująco (przy zastosowaniu symboliki z rys. 5.3.1):

a) całkowitą ilość suchej masy we wstędze papieru na linii suchej określa równanie 5.17:

$$m_{DL} = \rho_H Q_H x_H R_{fp} \quad (5.17)$$

b) całkowita ilość suchej masy w strumieniu odprowadzanej wody rejestrowej jest wyrażona równaniem (5.18):

$$m_{WW} = \rho_H Q_H x_H (1 - R_{fp}) \quad (5.18)$$

c) ilości frakcji włóknistej (równanie 5.19) i frakcji drobnej (równanie 5.20) we wstędze papieru na linii suchej:

$$m_{DL(wł)} = \rho_H Q_H x_H (1 - x_{H(fr)}) R_{fp(wł)} \quad (5.19)$$

$$m_{DL(fr)} = \rho_H Q_H x_H x_{H(fr)} R_{fp(fr)} \quad (5.20)$$

d) ilość całkowitej suchej masy w wodzie rejestrowej odpływającej do I wody podsitowej (równanie 5.21):

$$m_{WW} = \rho_H Q_H x_H (1 - R_{fp}) \quad (5.21)$$

e) ilość frakcji włóknistej (równanie 5.22) i frakcji drobnej (równanie 5.23) w wodzie rejestrowej odpływającej do I wody podsitowej:

$$m_{WW(wł)} = \rho_H Q_H x_H (1 - x_{H(fr)}) (1 - R_{fp(wł)}) \quad (5.22)$$

$$m_{WW(fr)} = \rho_H Q_H x_H x_{H(fr)} (1 - R_{fp(fr)}) \quad (5.23)$$

f) równanie (5.24) określa natężenie przepływu całkowitego strumienia materiału opuszczającego część rejestrową (na linii suchej):

$$Q_{DL} = \frac{m_{DL}}{x_{DL} \cdot \rho_{DL}} \quad (5.24)$$

g) natężenie przepływu całkowitego strumienia materiału z części rejestrowej do I wody podsitowej (równanie 5.25) i ułamek masowy substancji stałych w tym strumieniu (równanie 5.26):

$$Q_{WW} = Q_H - Q_{DL} \quad (5.25)$$

$$x_{WW} = \frac{m_{ww}}{\rho_{WW} \cdot Q_{ww}} \quad (5.26)$$

Bilans wodno-masowy dla drugiej strefy formowania będzie wyglądał podobnie, prawdziwe też będzie równanie (5.16), przy czym ułamek masowy frakcji drobnej będzie równy ułaskowi frakcji drobnej, która pozostała w formowanej wstędze papieru po opuszczeniu pierwszej strefy (czyli na linii suchej).

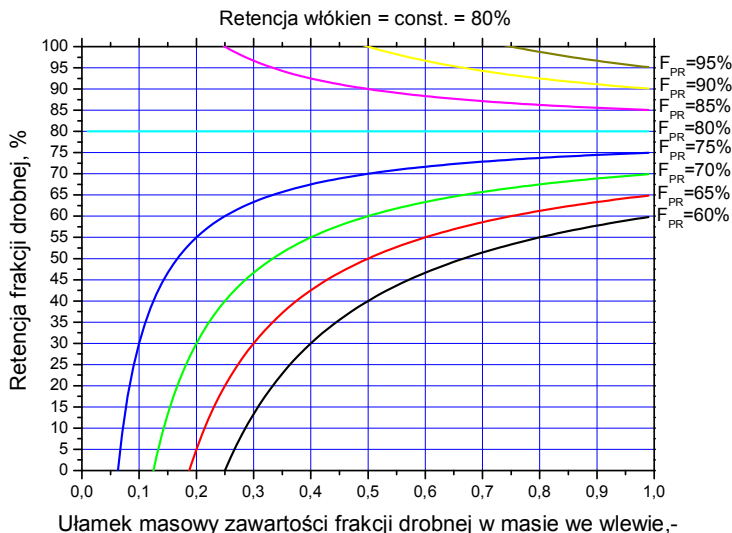
Do rozwiązania równania (5.16) konieczna jest znajomość retencji pierwszego przejścia w danej strefie odwadniania, retencji frakcji włóknistej w tej strefie oraz ułamka masowego zawartości frakcji drobnej w masie papierniczej dopływającej do danej strefy odwadniania. Najtrudniejszym do określenia wskaźnikiem jest w tym przypadku retencja frakcji włóknistej. Analiza omawianego równania będzie przeprowadzona w dalszej części niniejszego opracowania.

Pomiary przeprowadzone w warunkach przemysłowych wykazały, że stężenie frakcji drobnej w I wodzie podsitowej zwykle jest cechą indywidualną danej maszyny papierniczej oraz związanego z nią rodzaju wytwarzanego asortymentu wraz ze wszystkimi towarzyszącymi temu wymogami (np. współczynnikiem wyprzedzenia sita). Uzyskane wyniki z czterech różnych maszyn papierniczych zawierały się w granicach od 860 do ponad 3200 mg/dm³. Ponieważ wiadomo, że stężenie we wlewie maszyny papierniczej z reguły nie przekracza wartości 1,2%, to można łatwo obliczyć ze wzoru (2.3), że przy bardzo niskich wartościach retencji, rzędu 40%, stężenie I wody podsitowej może osiągać znacznie wyższe wartości, dochodzące do 7000 mg/dm³.

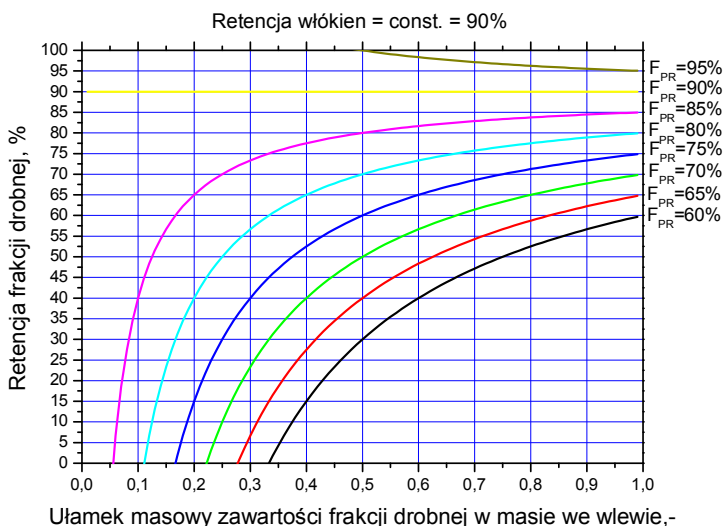
Znajomość stężenia zawiesiny w wodzie podsitowej jest niezwykle cenna z punktu widzenia analizy funkcjonowania procesu przemysłowego, bowiem może posłużyć do oceny aktualnego stanu równowagi masowej w układzie technologicznym oraz daje pewne podstawy do dalszego przewidywania możliwości odwadniania wstęgi papierniczej, co w konsekwencji przekłada się na ocenę ogólnej zdolności ruchowej maszyny papierniczej. W oparciu o wyniki własne i wyniki literaturowe wykonano więc analizę wzoru (5.16) dla różnych wartości retencji pierwszego przejścia. Wyniki tej analizy przedstawiono na rys. 5.3.2 i rys. 5.3.3. Krzywe przedstawione na tych rysunkach pokazują, że przy niższych wartościach retencji frakcji włóknistej (np. 80% i 90%) uzyskanie wysokiej retencji pierwszego przejścia na sicie maszyny papierniczej (powyżej 90%) jest możliwe tylko wtedy, gdy w masie jest duża zawartość frakcji drobnej silnie osadzającej się w formowanej wstędze papieru. W warunkach przemysłowych taka sytuacja może występować w przypadkach, kiedy mamy do czynienia z masami makulaturowymi gorszej jakości, np. OWP, OMG czy ONP, które są oparte na surowcach krótkowłóknistych i zawierają zwykle znaczne ilości frakcji drobnej. Oczywiście proces musi być w takim przypadku silnie wspomagany pomocniczymi środkami chemicznymi, które pozwolą uzyskać wysoką retencję pierwszego przejścia i retencję frakcji drobnej. Z punktu widzenia gospodarki wodno-masowej taka sytuacja jest korzystna, bowiem do wody obiegowej prze-

nika niewiele cząstek stałych. Woda jest pozbawiona cząstek stałych zawiesziny i choć zawiera substancje rozpuszczone, może być ponownie wykorzystana w wielu miejscach procesu bez konieczności ponoszenia dodatkowych kosztów na jej oczyszczanie.

a)

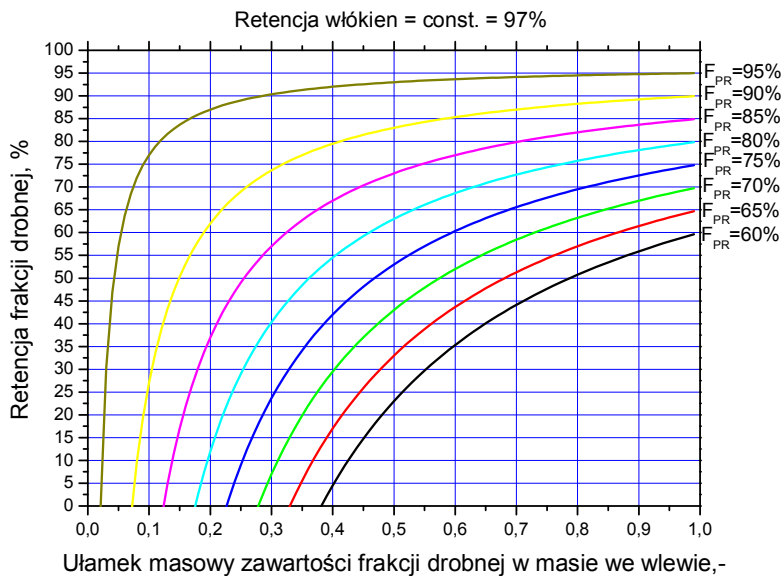


b)

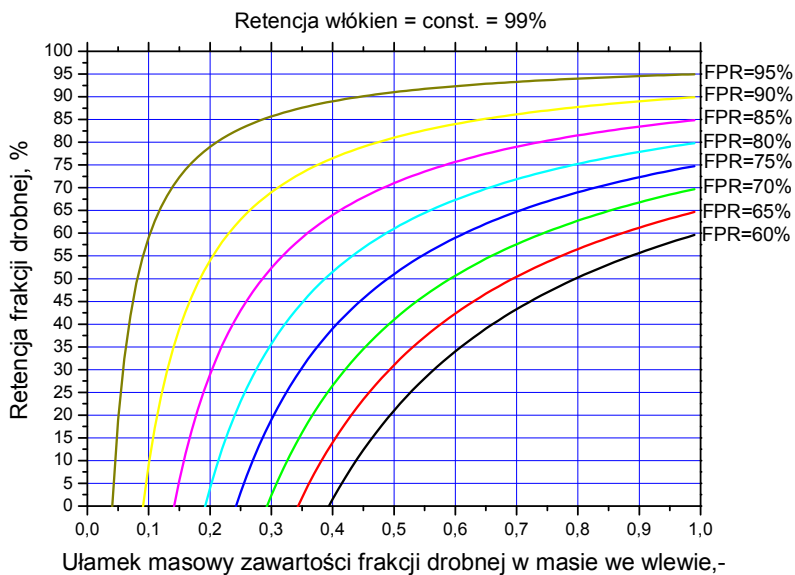


Rys. 5.3.2. Wpływ ilości frakcji drobnej w masie papierniczej na retencję tej frakcji dla różnych wartości retencji pierwszego przejścia i przy stałej, założonej retencji frakcji włóknistej równej: a) 80%, b) 90%

a)



b)



Rys. 5.3.3. Wpływ ilości frakcji drobnej w masie papierniczej na retencję tej frakcji dla różnych wartości retencji pierwszego przejścia i przy stałej, założonej retencji frakcji włóknistej równej: a) 97%, b) 99%

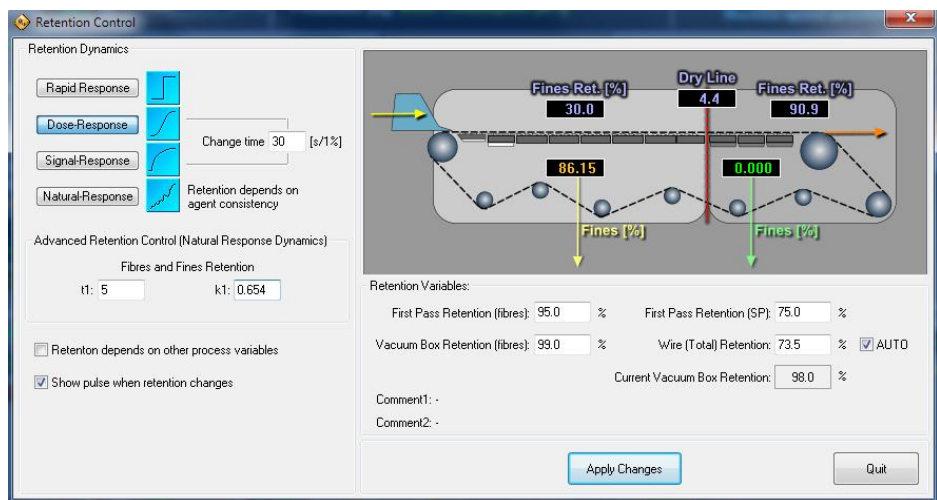
Dla wartości retencji pierwszego przejścia większych od retencji frakcji włóknistej interesujący jest fakt, że większą retencję frakcji drobnej uzyskuje się przy niższej zawartości tego składnika w masie papierniczej. W przypadku, kiedy wartości retencji frakcji włóknistej są wyższe niż retencja pierwszego przejścia, o ilości zawiesiny w wodzie obiegowej decyduje ilość frakcji drobnej w masie, a dopiero potem jej retencja. Dla gospodarki wodno-masowej maszyny papierniczej zawsze bardziej korzystna będzie sytuacja, kiedy w masie papierniczej jest mniej frakcji drobnej, aniżeli taka, w której występuje dużo frakcji drobnej, która w następstwie wspomaganie pomocniczymi środkami chemicznymi zostaje zatrzymana we wstędze papieru. Przykładem są wartości, które można odczytać z wykresu 5.3.3a. Dla retencji pierwszego przejścia równej 85%, przy zawartości frakcji drobnej w masie 50%, retencja frakcji drobnej będzie wynosiła ok. 73%. To oznacza, że na każdą tonę suchej masy papierniczej przetwarzanej w maszynie papierniczej, do wody obiegowej będzie trafiało ok. 135 kg frakcji drobnej. Natomiast dla tej samej wartości retencji pierwszego przejścia i przy zawartości frakcji drobnej w masie 30%, retencja frakcji drobnej będzie co prawda niższa (ok. 57%), ale do wody obiegowej będzie trafiać tylko ok. 129 kg tej frakcji (w przeliczeniu na tonę suchej masy papierniczej). Znajomość rozdziału poszczególnych składników masy papierniczej pozwala na obliczenie bilansu obiegu tych składników w całym układzie technologicznym.

Oddzielnym problemem jest opis dynamiki zmiany retencji. W literaturze (Han, 1964, Yli-Fossi, 2004) najczęściej proces ten jest opisywany za pomocą funkcji o charakterystyce wykładniczej. W opracowanym symulatorze zastosowano możliwość wyboru funkcji: od skoku jednostkowego, poprzez charakterystykę typu „Dose-Response” (stosowaną często do opisu zmian stężenia substancji w danym układzie, opisywaną ogólnym wzorem 5.27), charakterystykę wykładniczą (równanie 5.28) do charakterystyki proporcjonalnej do stężenia środka retencyjnego we wlewie maszyny papierniczej.

$$R = \frac{1}{1 + A_1 * e^{(-A_2 * \Delta t)}} \quad (5.27)$$

$$R = B_1 + B_2 * e^{\Delta t} \quad (5.28)$$

Z wyjątkiem funkcji skoku jednostkowego, pozostałe funkcje mogą być modyfikowane wprowadzaniem przez użytkownika współczynnikiem uwzględniającym czas jednostkowej zmiany retencji. Okno dialogowe ustawień retencji przedstawiono na rys. 5.3.4.



Rys. 5.3.4. Okno dialogowe ustawień retencji

Woda z części rejestrowej sekcji formującej (Q_2) odpływa do kadzi I wody podsitowej i jest bezpośrednio wykorzystywana do rozcieńczania masy gęstej po kadzi maszynowej (strumień Q_4). Do kadzi I wody podsitowej trafia również część wody z natrysków myjących sito (Q_{fw}). W zależności od ustawień początkowych procesu może do tej kadzi również odpływać nadmiar II wody podsitowej (Q_6). Zwykle jednak to nadmiar I wody podsitowej (Q_{przel}) odpływa do kadzi II wody podsitowej.

Bilans masowy kadzi I wody podsitowej wygląda więc następująco (równanie 5.29):

$$\rho_4 V_{silo} \frac{dx_4}{dt} = \rho_2 Q_2 x_2 + \rho_{fw} Q_{fw} x_{fw} + \rho_5 Q_6 x_5 - \rho_4 Q_4 x_4 - \rho_4 Q_{przel} x_4 \quad (5.29)$$

Również w tym przypadku wszystkie gęstości przyjęto za równe. Należy zwrócić uwagę, że podczas trwania procesu mogą w tej kadzi występować okresowo wahania ilości I wody podsitowej, co jest zgodne z równaniem (5.30):

$$\text{dla } 0 < V_{silo} \leq V_{silo(max)} \quad \frac{dV_{silo}}{dt} = Q_2 + Q_{fw} + Q_6 - Q_4 - Q_{przel} \quad (5.30)$$

Po wypełnieniu kadzi I wody podsitowej, czyli po przekroczeniu objętości $V_{silo(max)}$, następuje z niej przelew w sposób swobodny. Ostatnim, istotnym elementem w modelu sekcji „mokrej” maszyny papierniczej jest bilans wodno-masowy sekcji prasowej, do której w celu dalszego odwodnienia wstęga papieru kierowana jest bezpośrednio z sekcji formującej. Jest to też ostatni etap produkcji papieru, w którym woda jest usuwana z procesu w postaci ciekłej.

W modelu założono, że sekcja prasowa pracuje z maksymalną efektywnością, tzn. usuwa maksymalną, możliwą ilość wody ze wstęgi papierniczej. Przy takim założeniu limitem odwadniania wstęgi papierniczej w tej części maszyny papierniczej jest tzw. suchość nominalna (Przybysz, 1982). Jest to graniczna suchość wstęgi papierniczej, możliwa do osiągnięcia drogą odwadniania mechanicznego. Wskaźnik ten jest uzależniony głównie od właściwości masy papierniczej (stopnia jej spęcznienia, stopnia spęcznienia zawartej w niej frakcji drobnej oraz ilości tej frakcji we wstędze papierniczej). Można go wyznaczyć ze wzoru (5.31):

$$s_N = \frac{1}{WRV_m + 1} \quad (5.31)$$

Wskaźnik stopnia spęcznienia masy papierniczej WRV_m , z której wytworzona jest prasowana wstęga papieru, wyliczano ze wzoru (4.4) dla wcześniej obliczonych wartości WRV włókien i frakcji drobnej (wzory 4.5 i 4.6). Jedną z wielkości, która jest wymagana do wykonania tego obliczenia, jest zawartość frakcji drobnej we wstędze papieru wyliczana na podstawie bilansu masowego tego składnika w obrębie sekcji formującej (omawiane wcześniej równanie 5.16).

Strumień masowy (wstęga papiernicza o suchości s_N) opuszczający sekcję prasową maszyny papierniczej (przy założeniu, że w tej sekcji nie występują już straty materiału) będzie wynosił:

$$Q_{14} = \frac{Q_3 x_3}{s_N} \quad (5.32)$$

W obliczeniach suchość nominalna s_N była pod postacią ułamka dziesiętnego. Po uwzględnieniu równań (4.4) i (5.32) otrzymano wzór (5.33):

$$Q_{14} = Q_3 x_3 [1 + (1 - x_{w(fr)})WRV_{wt} + x_{w(fr)}WRV_{fr}] \quad (5.33)$$

Znając strumienie: wejściowy i wyjściowy, można następnie określić całkowitą ilość wody odprowadzanej z sekcji prasowej i zwracanej do obiegu wodno-masowego:

$$Q_{pras} = Q_3 - Q_{14} \quad (5.34)$$

Warto też zauważyć, że pozostała we wstędze papierniczej woda niesie ze sobą określony ładunek substancji rozpuszczalnych, które w ten sposób (razem z produktem) są usuwane z układu wodno-masowego maszyny papierniczej.

5.4. Bilans wodno-masowy II obiegu wodnego

Do II obiegu wodnego trafia nadmiar I wody podsitowej, woda ze skrzynek ssących sekcji formującej oraz woda z sekcji prasowej maszyny papierniczej. W niektórych przypadkach może tu trafić także część wody z natrysków myjących sito. Wszystkie te strumienie są kierowane do kadzi II wody podsitowej. Bilans zmiany udziału substancji stałych w kadzi II wody podsitowej wygląda więc następująco (równanie 5.35):

$$\rho_5 V_{s2w} \frac{dx_5}{dt} = \rho_4 Q_{przel} x_4 + \rho_{VBOX} Q_{VBOX} x_{VBOX} + \rho_{fw} Q_{fw} x_{fw} - \rho_5 Q_5 x_5 \quad (5.35)$$

Także w tym przypadku wszystkie gęstości przyjęto za równe. Podobnie jak w przypadku wcześniej wymienionych kadzi o określonej, niezerowej objętości, tak również i tutaj mogą okresowo występować wahania ilości II wody podsitowej zgodnie z równaniem (5.36):

$$\text{dla } 0 < V_{s2w} \leq V_{s2w(\max)} \quad \frac{dV_{s2w}}{dt} = Q_{przel} + Q_{VBOX} + Q_{fw} - Q_5 \quad (5.36)$$

W układzie technologicznym odpływający strumień Q_5 może być dalej rozdzielony na trzy strumienie. Część odpływającej II wody podsitowej może być zawrócona do kadzi I wody podsitowej (jeżeli pojawia się niedobór I wody podsitowej do rozcieńczania masy gęstej). Część strumienia Q_5 może być zrzucana bezpośrednio do ścieków z pominięciem układu oczyszczania. Najczęściej jednak nadmiar II wody podsitowej jest poddawany oczyszczaniu w celu usunięcia cząstek stałych zawiesiny. Powoduje to zwiększenie możliwości ponownego wykorzystania tej wody w procesie. W proponowanym modelu możliwe jest zastosowanie wszystkich powyższych opcji.

Urządzenie odwłókniające w II obiegu wodnym opisano w sposób uproszczony za pomocą wskaźnika efektywności (sprawności) odwłókniania α_{DF} i ułamka masowego x_{12} określającego ilość suchej substancji w strumieniu masy odzyskanej odpływającej z urządzenia. Są to wskaźniki, których wartości można stosunkowo łatwo uzyskać w warunkach przemysłowych. Przyjęto dodatkowo, że w urządzeniu odwłókniającym odzyskiwane jest 100% frakcji włóknistej zawartej w strumieniu dolotowym. Bazując na powyższych założeniach oraz znanych parametrach strumienia dolotowego (Q_8 , x_5 , $x_{5(fr)}$), można bilans wodno-masowy poszczególnych strumieni wyrazić następująco:

a) strumień masy odzyskanej:

$$Q_{12} = \frac{\alpha_{DF} Q_8 x_5}{x_{12}} \quad (5.37)$$

b) udział frakcji drobnej w masie odzyskanej:

$$x_{12(fr)} = 1 - \frac{Q_8 x_5 (1 - x_{5(fr)})}{Q_{12} x_{12}} \quad (5.38)$$

c) ułamek masowy udziału substancji suchej (100% frakcji drobnej) w wodzie odwłóknionej (sklarowanej):

$$x_6 = \frac{Q_8 x_5 (1 - \alpha_{DF})}{Q_9} \quad (5.39)$$

gdzie całkowity strumień wody odzyskanej równy jest:

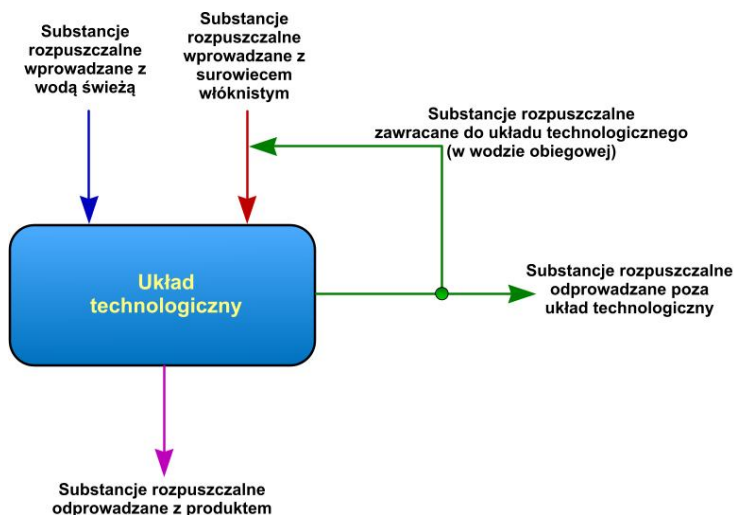
$$Q_9 = Q_8 - Q_{12} \quad (5.40)$$

d) bilans masowy kadzi wody odwłóknionej z filtra tarczowego:

$$\rho_7 V_{odwłók} \frac{dx_7}{dt} = \rho_6 Q_9 x_6 - \rho_7 x_7 (Q_{10} + Q_{11}) \quad (5.41)$$

5.5. Ogólne zasady tworzenia bilansu substancji rozpuszczonych

Obok obliczeń bilansu wodno-masowego w programie przebiegają równoległe podobne obliczenia bilansowe dla stężeń substancji rozpuszczonych z uwzględnieniem opóźnień wynikających z objętości poszczególnych układów oraz natężeń przepływu. Bilans wszystkich substancji rozpuszczonych, wchodzący w skład modelu równowagi fizykochemicznej przedstawiono ogólnie na rys. 5.5.1.



Rys. 5.5.1. Ogólny schemat obiegu substancji rozpuszczonych w papierni

Obliczenia bilansowe zostały oparte na równaniach, które wcześniej sformułowano dla modelu wodno-masowego, przy czym oczywiście rozdział substancji rozpuszczonych w sekcji formującej, prasowej oraz w urządzeniu oczyszczającym (odwłókniającym) jest zdeterminowany rozdziałem strumieni wody. Jak wcześniej wspomniano, model równowagi fizykochemicznej oparto na wskaźnikach: ChZT oraz przewodności właściwej (EC). Możliwość zastosowania takiego rozwiązania została potwierdzona w oparciu o wcześniejsze doświadczenia wykonane przez Bolmstedta (2000) i częściowo powtórzone przez autora niniejszej pracy (Olejnik, 2008b). W badaniach tych stwierdzono, że w warunkach, które są przedmiotem symulacji, wartości zastosowanych wskaźników podlegają prawom addytywności.

W przypadku organicznych substancji rozpuszczonych konieczna jest znajomość ich ilości (ładunku) w strumieniu wejściowym wyrażona w jednostkach ChZT/kg surowca włóknistego. Początkowy ładunek nieorganicznych substancji rozpuszczonych może być wyrażony w jednostkach przewodności na jednostkę masy surowca włóknistego ($\mu\text{S}/\text{cm}/\text{kg}$), jednakże same obliczenia podczas symulacji wykonywane są dla wartości wyrażonych w mg/dm^3 .

W obliczeniach przyjęto, że początkowe stężenie organicznych i nieorganicznych substancji rozpuszczalnych w masie papierniczej (w ciągu technologicznym, przed procesem mielenia) musi być wprowadzone przez użytkownika wraz z czasem określającym dotychczasowy czas przebywania w układzie. Na tej podstawie, jak również na podstawie wyliczonych opóźnień występujących w procesie wynikających z określonych, niezerowych objętości wybranych obiektów i natężeń przepływu przez te obiekty, wyznaczany jest ostateczny przyrost ładunku substancji rozpuszczonych w modelowanym układzie. Przyrost ten określany jest za pomocą równań (4.10) i (4.11).

Konwersja wskaźnika EC do całkowitej ilości substancji rozpuszczonych polega na pomnożeniu uzyskanej wartości przewodności przez odpowiedni współczynnik przeliczeniowy, który zwykle zawiera się w granicach 0,4-0,9 (Walton, 1989). Dokładna wartość tego współczynnika jest ściśle uzależniona od rodzaju substancji zawartych w badanej wodzie (Walton, 1989, Thirumalini i Kurian, 2009a i b). Dla wód technologicznych pochodzących z papierni zalecane są wartości z zakresu 0,7-0,9 (Light et al., 2005). W oparciu o pomiary wykonane w warunkach przemysłowych wyznaczona wartość tego wskaźnika dla badanych wód technologicznych wynosiła 0,90.

Opis bilansu i modelu obiegu substancji rozpuszczonych można znaleźć w pracach autora (Olejnik, 2006, 2008a i b).

5.6. Model zdolności ruchowej maszyny papierniczej

Istotnym czynnikiem podczas wykonywania symulacji komputerowych różnych procesów fizycznych jest określanie wartości granicznych dla wykonywanych obliczeń. Często bowiem jest tak, że z praktycznego punktu widzenia

ich realizacja może nie mieć już sensu, mimo istnienia dalszych możliwości obliczeniowych. Innymi słowy, w programie symulacyjnym powinien być zawarty dodatkowy model określający realne ograniczenia fizycznego procesu, czyli jego „zdolność ruchową” (ang. runnability).

Istnienie takiego modelu jest szczególnie istotne w przypadkach bardzo złożonych, np. kiedy występuje duża ilość parametrów zmiennych, które dodatkowo wchodzi we wzajemne interakcje. Ponieważ w omawianym przypadku występują oba te czynniki, to obok podstawowych modeli bilansów równowag cząstkowych, w programie symulacyjnym zaimplementowano uproszczony model „zdolności ruchowej” sekcji formującej maszyny papierniczej.

Oprócz ograniczeń typowo konstrukcyjnych najważniejszym ograniczeniem w przypadku tej sekcji jest zdolność do odwadniania limitowana właściwościami formującej się wstęgi papierniczej.

Głównymi parametrami, które w warunkach przemysłowych wpływają na tę właściwość są:

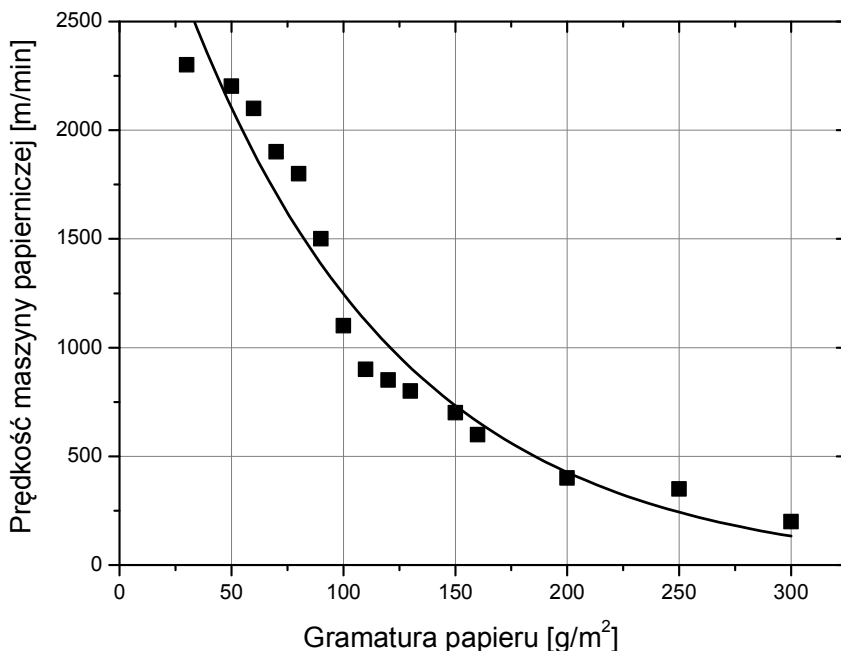
- czas odwadniania (determinowany prędkością maszyny papierniczej),
- gramatura wstęgi papierniczej,
- zawartość frakcji drobnej we wstędze.

Ze względu na wydajność procesu każda maszyna papiernicza powinna pracować z maksymalną możliwą prędkością, przy której ryzyko zakłócenia procesu produkcyjnego jest niewielkie. Przyspieszanie maszyny wiąże się jednak m.in. ze skróceniem czasu przebywania wstęgi w poszczególnych sekcjach maszyny, w których wstęga papiernicza w wyniku jej odwadniania i suszenia nabiera pożądanych właściwości użytkowych, do których należą m.in. właściwości wytrzymałościowe. Niedostatecznie odwodniona wstęga papiernicza może być zbyt słaba, by dało się ją przenieść do kolejnych etapów procesu, co w granicznym przypadku może doprowadzić do jej zerwania, a tym samym utraty zdolności ruchowej maszyny.

Rozważając czas odwadniania wstęgi na sicie, warto podkreślić, że obecnie najnowocześniejsze maszyny papiernicze osiągają imponujące parametry: szerokość ok. 10 m, prędkość do 40 m/s oraz wydajność do 4500 t/dobę. Maszyny mogą różnić się konstrukcyjnie oraz technologicznie w zależności od produkowanego asortymentu. Oczywiście jest, że ten sam rodzaj papieru można produkować z różną prędkością, jednak istnieje generalny związek pomiędzy tym parametrem a gramaturą: ok. 100 m/min dla tektur o gramaturze powyżej 1000 g/m², ok. 200-500 m/min dla tektur o gramaturze 250-350 g/m², do przeszło 2000 m/min dla papierów higienicznych tissue o gramaturze od 15-32 g/m². Na rys. 5.6.1 pokazano rezultaty porównania uśrednionych wartości prędkości maszyn papierniczych w zależności od produkowanych gramatur. Przebieg krzywej wskazuje, że, wraz ze wzrostem gramatury, prędkość maszyn papierniczych maleje wykładniczo. Po przeanalizowaniu uzyskanego wykresu stwierdzono, że przebieg krzywej można przybliżyć równaniem (5.42):

$$v_s = -31,24 + 3568 * e^{\frac{-g_r}{97,39}} \quad (5.42)$$

Równanie jest słuszne dla zakresu gramatur 30-300 g/m² i prędkości w zakresie 100-2300 m/min, choć oczywiście jest to pewne uproszczenie wynikające z założenia istnienia pewnej hipotetycznej, stałej zdolności odwadniania sekcji formującej.



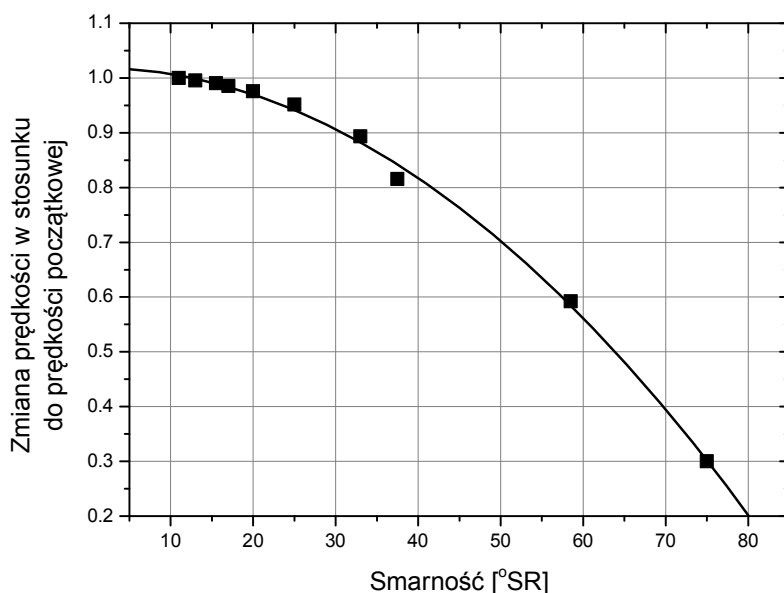
Rys. 5.6.1. Uśredniona prędkość różnych maszyn papierniczych w zależności od gramatury produkowanego wytworu papierniczego

Obok powyższego porównania wykonano drugą analizę dotyczącą wpływu zawartości frakcji drobnej w masie (z której powstaje wstęga papieru) na jej odwadnialność (określaną za pomocą wskaźnika smarności tej masy). Analiza została oparta o uśrednione dane pochodzące z mielenia modelowej masy włóknistej, dla której wykonywano większość badań. W zależności od rodzaju masy i sposobu jej mielenia, w stosunku do zaprezentowanych wyników mogą występować pewne różnice. Wówczas konieczne będzie odpowiednie dopasowanie uzyskanego równania. W niniejszym modelu chodziło głównie o znalezienie podstawowych zależności pomiędzy wykorzystywanymi wskaźnikami oraz sposobu implementacji tych zależności w programie.

Rys. 5.6.2 pokazuje rezultaty powyższego porównania. Zmianę (spadek) prędkości w stosunku do możliwej maksymalnej prędkości otrzymano przy założeniu, że parametr ten jest proporcjonalny do standardowego wskaźnika

odwadnialności masy papierniczej (oznaczanego w aparacie Schoppera-Rieglera jako czas wypływu 700 ml cieczy). Poszczególne wartości oznaczonej odwadnialności przypisano do odpowiednich wartości smarności dla badanej masy. W trakcie obliczeń uznano, że największa wartość odwadnialności będzie odpowiadała maksymalnemu (70%) spadkowi prędkości. Uzyskany przebieg krzywej wskazywał, że dla małych wartości (do ok. 35 °SR) smarność masy stosunkowo nieznacznie wpływała na obniżenie maksymalnej, możliwej do osiągnięcia prędkości. Powyżej 35 °SR następuje znaczne zmniejszenie omawianego wskaźnika – aż do 50% pierwotnej wartości dla smarności powyżej 60 °SR i do ok. 30% powyżej 70 °SR. Krzywą tę opisano wzorem (5.43):

$$\Delta v_s = 1,019 + 0,0001258 * SR - 0,000129129 * SR^2 \quad (5.43)$$

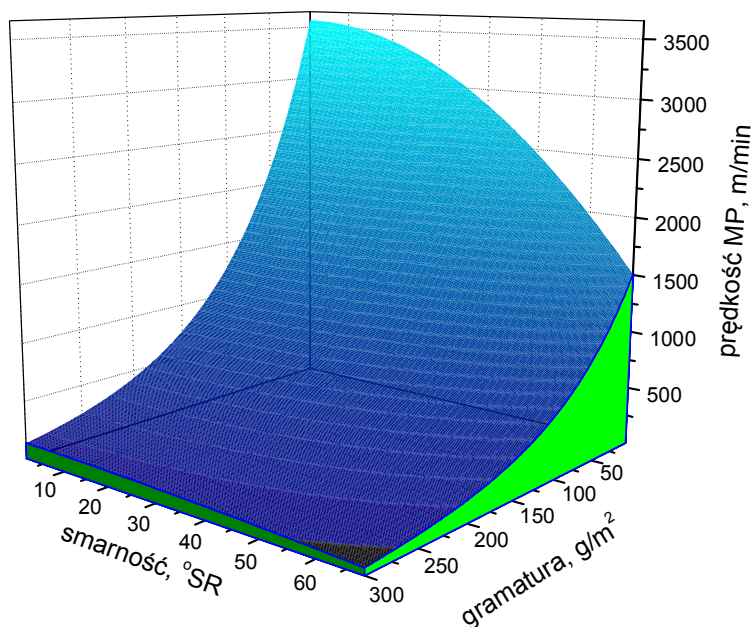


Rys. 5.6.2. Wpływ frakcji drobnej (mierzonej wskaźnikiem smarności masy) na zmniejszenie możliwości ruchowych maszyny papierniczej (mierzonych w stosunku do prędkości maksymalnej)

Przyjmując maksymalną, możliwą do osiągnięcia w danych warunkach prędkość jako wskaźnik ograniczenia ruchowego maszyny papierniczej, połączono obie uzyskane zależności w równanie trójwymiarowe (5.44):

$$v_{max} = \left(-31,24 + 3568 * e^{\frac{-g_r}{97,39}} \right) * (1,019 + 0,0001258SR - 0,000129129 * SR^2) \quad (5.44)$$

Równanie (5.44) umożliwiło określenie maksymalnej prędkości maszyny papierniczej dla danej gramatury wytworu papierniczego i danej zawartości frakcji drobnej w masie papierniczej (określanej wskaźnikiem smarności we wlewie), z której ten wytwór był produkowany (rys. 5.6.3). Zwiększenie prędkości maszyny ponad prędkość v_{\max} (czyli skrócenie minimalnego czasu przebywania wstęgi papierniczej w strefie odwadniania) powodowało proporcjonalne zmniejszenie końcowej suchości papieru. Oznaką tego, podobnie jak w warunkach rzeczywistych, było przesuwanie się tzw. linii suchej. Linia sucha to charakterystyczne miejsce w odwadnianej wstędze papierniczej, gdzie rozpoczyna się przenikanie powietrza przez strukturę papieru. W miejscu tym zanika lustro wody na powierzchni formowanej wstęgi papierniczej, zmienia się odbicie światła z lustrzanego na rozproszone, przez co miejsce to jest doskonale widoczne gołym okiem.

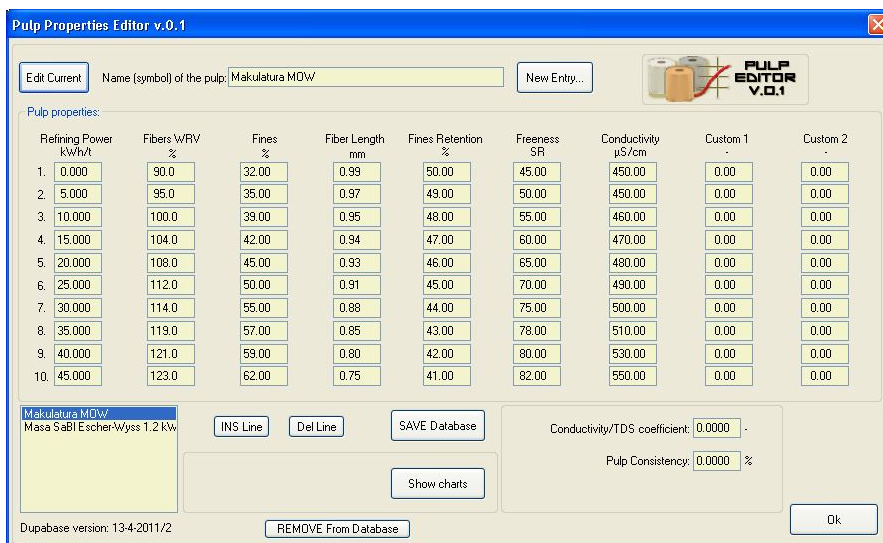


Rys. 5.6.3. Hipotetyczna zależność maksymalnej możliwej do osiągnięcia prędkości maszyny papierniczej dla określonej gramatury papieru i smarności masy, z której ten papier jest wytwarzany

W przypadku modelowania procesów papierniczych istotnym czynnikiem w modelu są wspomniane już właściwości masy papierniczej, których nie sposób pominąć lub uogólnić. Właściwości te są bowiem zwykle unikatowymi cechami każdej masy. Aby więc uniknąć mniejszej dokładności obliczeń, konieczne jest wprowadzanie odpowiednich współczynników korygujących lub znajomość indywidualnych wskaźników, które charakteryzują daną masę papierniczą. W opracowanym programie uwzględniono możliwość zastosowania

obu tych opcji. Niektóre masy opisano szczegółowymi równaniami empirycznymi, a oprócz tego stworzono tzw. edytor mas papierniczych (rys. 5.6.4), gdzie można wpisać najważniejsze wskaźniki z uwzględnieniem zmian ich wartości pod wpływem najważniejszych operacji jednostkowych (głównie mielenia). W trakcie pracy programu dane te mogą zostać wykorzystane do symulowania procesu z uwzględnieniem indywidualnych cech danej masy papierniczej.

Na koniec tego rozdziału warto podkreślić, że cały matematyczny opis modelowanego układu technologicznego (włączając w to wszystkie, uwzględniane równowagi cząstkowe oraz obliczenia pomocnicze) zajmuje w programie symulacyjnym ponad 1500 wierszy kodu, zaś cały program zawarty jest w ponad 20.000 liniach kodu.



Rys. 5.6.4. Edytor właściwości mas papierniczych

5.7. Weryfikacja modelu

W celu zweryfikowania poprawności sporządzonego modelu wykonano pomiary wybranych parametrów w warunkach przemysłowych w trakcie normalnej pracy maszyny papierniczej. Parametrami tymi były ustawienia robocze MP (natężenie przepływu przez zawór gramatury, stężenia strumieni wejściowych i wyjściowych, prędkość maszyny, współczynnik wyprzedzenia sita i gramatura produkowanego papieru). Następnie uruchamiano symulator z takimi samymi danymi wejściowymi i sprawdzano, czy uzyskiwane wyniki odpowiadają wartościom rzeczywistym.

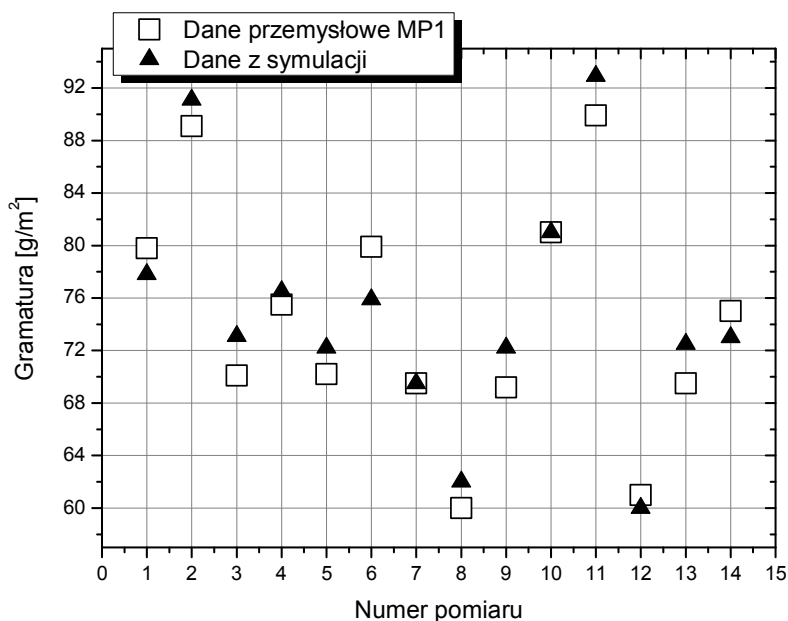
Przy poprawnym działaniu symulowanego układu założono, że dla powyższych danych wejściowych i przy uwzględnieniu początkowych właściwości

stosowanej masy włóknistej (zawartość frakcji drobnej, stopień spęcznienia, początkowa smarność) powinno uzyskać się porównywalne wyniki:

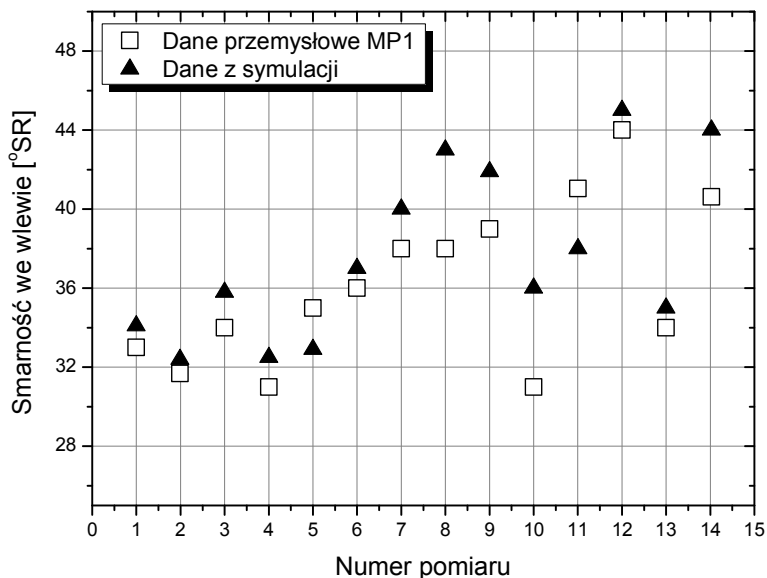
- gramatury produkowanego papieru,
- smarności rozcieńczonej masy we wlewie,
- stężenia i wody podsitowej.

Najpoważniejszą trudnością jest fakt, że zbieranie danych do weryfikacji możliwe było tylko wówczas, kiedy układ technologiczny pracował bez zakłóceń wystarczająco długo (ok. 6-8 godzin), aby można było przyjąć, że osiągnął swoją równowagę technologiczną. W warunkach przemysłowych jest to przedsięwzięcie bardzo trudne.

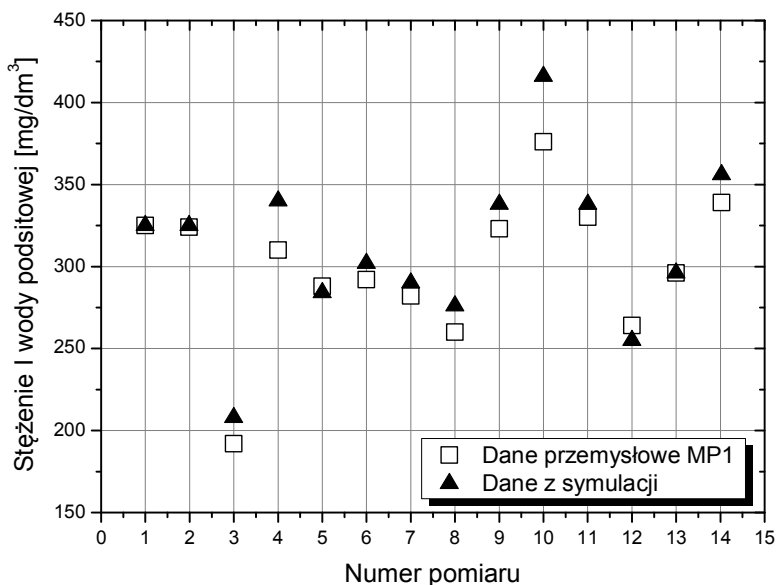
Ze względu na brak możliwości wprowadzania zaburzeń do rzeczywistego procesu (co jest konieczne do identyfikacji dynamicznej modelu), ograniczono się do wykonania weryfikacji statycznej. Do weryfikacji modelu bilansu wodno-masowego i frakcji drobnej wykorzystano dane wejściowe rzeczywistej maszyny papierniczej podane w tabeli 5.4. Uzyskane wyniki porównawcze dla wymienionych wyżej wskaźników przedstawiono na rys. od 5.7.1 do 5.7.3.



Rys. 5.7.1. Porównanie gramatur wyliczonych przez program z wartościami zmierzonymi w warunkach przemysłowych



Rys. 5.7.2. Porównanie smarności we wlewie, jako funkcji ilości frakcji drobnej znajdującej się w obiegu maszyny papierniczej (wartości wyliczone przez program i zmierzone w warunkach przemysłowych)



Rys. 5.7.3. Porównanie stężeń I wody podsitowej wyliczonych przez program z wartościami zmierzonymi w warunkach przemysłowych

Tabela 5.4. Dane wejściowe uzyskane w trakcie pomiarów przemysłowych dla rzeczywistej maszyny papierniczej

Lp.	Gramatura g/m ²	Wilgotność końcowa		Wlew		Zawór gramatury		Zawłóknienie I wody podsitowej mg/dm ³	Retencja R _{sp} %	Prędkość sita m/min	Wsp. wyprzedzenia sita –	Wydajność t/h
		stęż., %	°SR	stęż., %	°SR	stęż., %	°SR					
1	79,8	7,8	33	0,21	33	3,66	18	3690	85,2	428	1,03	9,0
2	89,1	7,9	32	0,25	32	3,56	17	4200	87,0	418	1,10	9,8
3	70,1	7,9	34	0,22	34	3,50	20	3570	90,6	457	1,03	8,4
4	75,5	7,8	31	0,21	31	3,63	18	3429	84,1	416	1,00	8,3
5	70,2	7,8	35	0,20	35	3,97	20	3062	86,1	442	1,00	8,1
6	79,9	7,9	36	0,23	36	3,82	20	3683	87,0	445	1,03	9,4
7	69,5	7,7	38	0,21	38	3,54	21	3355	86,4	430	1,02	7,9
8	60,0	7,9	38	0,19	38	3,57	22	3020	85,9	447	1,05	7,2
9	69,2	7,9	39	0,19	39	3,54	24	3425	82,7	445	1,00	8,1
10	81,0	8,0	31	0,25	31	3,75	22	3799	83,6	444	1,01	9,5
11	89,9	7,4	38	0,26	38	4,07	20	4075	87,1	435	1,03	10,4
12	61	7,7	44	0,18	44	3,65	21	3129	85,3	475	1,02	7,6
13	69,5	7,5	34	0,21	34	3,39	21	3834	86	451	1,05	8,4
14	75	7,5	44	0,22	44	3,61	20	3999	84,2	447	1,05	8,9

Na podstawie przeprowadzonych porównań weryfikacyjnych można wysunąć stwierdzenie, że sporządzony bilans materiałowy jest poprawny w zadowalającym stopniu i jako taki może znaleźć zastosowanie w badaniach nad pracą maszyny papierniczej.

W celu wstępnego zweryfikowania obliczeń bilansu fizykochemicznego wykonano pomiary przewodności właściwej w ciągu technologicznym tej samej maszyny papierniczej, dla której oznaczano dane do weryfikacji bilansu materiałowego. Pomiary wykonywano w odstępach kilkutygodniowych, przy czym zawsze starano się zrobić to w momencie, kiedy maszyny pracowały przez dłuższy okres czasu stabilnie i produkowały ten sam asortyment. Stąd stosunkowo niewielka liczba pomiarów do weryfikacji. Jednakże takie podejście pozwalało z dużym prawdopodobieństwem założyć, że równowaga technologiczna w układzie jest już ustalona, a uzyskiwane wyniki odzwierciedlają faktyczny stan tej równowagi. Przeprowadzenie powyższej weryfikacji wymagało uwzględnienia natężeń przepływów oraz stężeń podstawowych strumieni ciągu technologicznego. Numery porządkowe danych odpowiadają numerom danych bilansu wodno-masowego z tabeli 5.4.

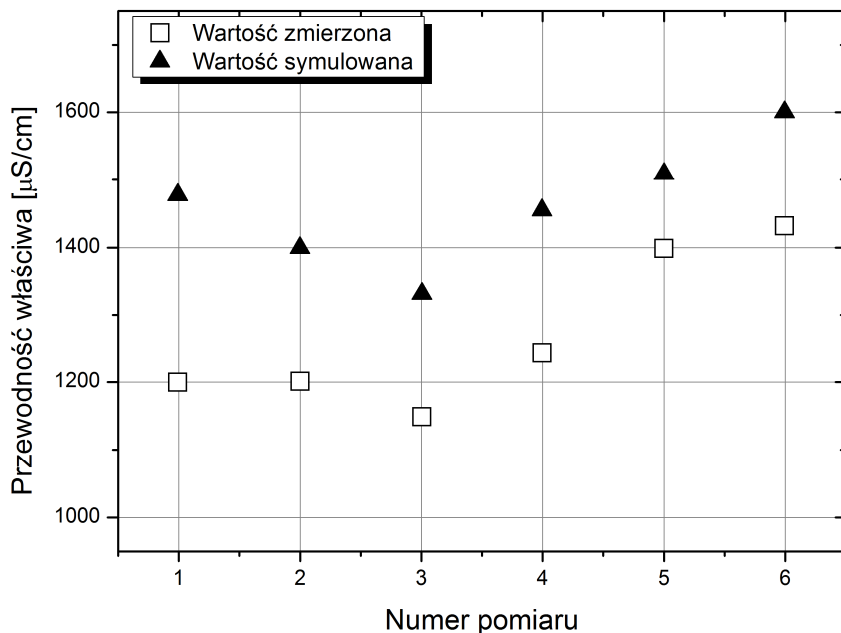
Wartości początkowe ładunku substancji rozpuszczalnych w strumieniach wejściowych podano w tabeli 5.5.

Konieczne jest przy tym wyjaśnienie, że w badanym, rzeczywistym układzie przemysłowym dozowane były do masy włóknistej dodatkowe środki chemiczne. Ponieważ oddzielne uwzględnianie ich wpływu było problematyczne, uznano, że stanowią one część łącznego ładunku badanych substancji (organicznych i nieorganicznych) zawartych w badanej masie włóknistej. Podczas weryfikacji nie uwzględniano też wpływu czasu t_{90} . Przyjęto, że zmierzony ładunek danego rodzaju substancji w danym strumieniu wejściowym jest wartością stałą.

Tabela 5.5. Porównanie wyników pomiarów przewodności właściwej przeprowadzone w warunkach przemysłowych dla maszyny papierniczej z wynikami pochodzącymi z symulacji

Lp.	EC [$\mu\text{S}/\text{cm}$]			
	Masa gęsta	Woda świeża	I woda podsitowa	
	Dana wejściowa	Dana wejściowa	Pomiar	Symul.
1	1260	460	1210	1475
2	1280	465	1200	1405
3	1430	480	1150	1330
4	1300	475	1240	1445
5	1430	450	1410	1505
6	1605	470	1425	1600

Dla weryfikacji obliczeń bilansowych wykonano pomiary przewodności właściwej w I wodzie podsitowej maszyny papierniczej, która stanowiła pierwowzór modelowanego układu technologicznego. Wyniki przedstawia rys. 5.7.4.



Rys. 5.7.4. Porównanie wartości przewodności właściwej I wody podsitowej dla rzeczywistej maszyny papierniczej i wyników uzyskanych w wyniku przeprowadzonej symulacji

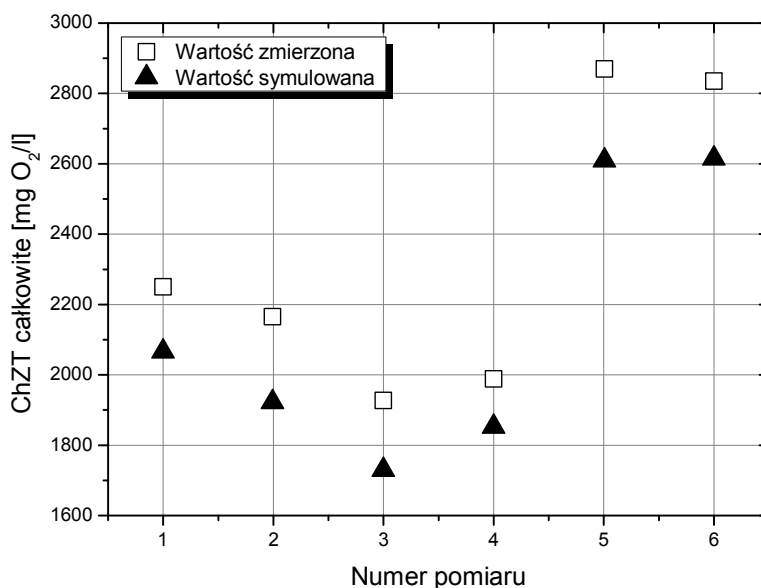
Jak wynika z rys. 5.7.4, różnice pomiędzy wartościami zmierzonymi a uzyskanymi drogą symulacji wynosiły od ok. 100 do ok. 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Różnice te były znacznie niższe niż zmierzona przewodność właściwa wody świeżej (średnio ok. 460 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Zatem uznano, że uzyskana dokładność była dostatecznie dobra, choć niewielka liczba serii pomiarowych powoduje, że w przyszłości konieczne będzie dalsze zbieranie danych w celu potwierdzenia niniejszej weryfikacji.

Weryfikacja wskaźnika całkowitego ChZT oparta była na tych samych zasadach co przewodność właściwa. Wartości początkowe ładunku organicznych substancji rozpuszczalnych w strumieniach wejściowych podano w tabeli 5.6.

Tabela 5.6. Porównanie wyników pomiarów ChZT przeprowadzone w warunkach przemysłowych dla maszyny papierniczej z wynikami pochodzącymi z symulacji

Lp.	ChZT [mg O ₂ /dm ³]			
	Masa gęsta (ChZT filtratu)	Woda świeża	I woda podsitowa	
	Dana wejściowa	Dana wejściowa	Pomiar	Symul.
1	2350	130	2240	2055
2	2270	110	2170	1925
3	2210	120	1920	1720
4	2180	100	1980	1850
5	2925	90	2870	2610
6	2990	120	2830	2620

Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 5.7.5. Również w przypadku wskaźnika ChZT można mówić o zadowalającym przybliżeniu modelowanego układu. Różnice między wartościami zmierzonymi i uzyskanymi drogą symulacji tego parametru wyniosły od ok. 100 do ok. 260 mg O₂/dm³.



Rys. 5.7.5. Porównanie wartości ChZT I wody podsitowej dla rzeczywistej maszyny papierniczej i wyników uzyskanych w wyniku przeprowadzonej symulacji

6. ANALIZA WYBRANYCH ASPEKTÓW WSPÓLDZIAŁANIA RÓWNOWAG CZĄSTKOWYCH W UKŁADZIE TECHNOLOGICZNYM MASZYNY PAPIERNICZEJ – PRZYKŁADY DZIAŁANIA OPRACOWANEGO SYMULATORA

Celem niniejszego rozdziału jest pokazanie możliwości obliczeniowych opracowanego symulatora na dwóch przykładach. Pierwszy z nich dotyczy zmian zachodzących w równowadze modelowanego procesu pod wpływem zmian jednostkowego zużycia wody świeżej. Drugi przykład pokazuje efekt zmiany retencji na sicie maszyny papierniczej na równowagę wodno-masową w papierni.

Jak już wspomniano, konsekwencją wynikającą z wzajemnych powiązań między poszczególnymi równowagami cząstkowymi jest fakt, iż każdorazowa zmiana stanu którejkolwiek z równowag wpływa w sposób bezpośredni na stan układu technologicznego, a ponadto oddziałując na stan pozostałych równowag cząstkowych, wpływa na ten układ również w sposób pośredni. Bez względu na to, jakie zmiany zachodzą w samym układzie technologicznym (oczywiście w określonych granicach), w procesie produkcyjnym najistotniejsze jest utrzymanie jakości produktu przy określonej wydajności procesu. Dlatego też wszelkie analizy dotyczące zmian równowagi technologicznej powinny być prowadzone z uwzględnieniem tych czynników.

Tabela 6.1. Dane wejściowe dla programu symulacyjnego

Parametr	Wartość początkowa
Prędkość maszyny papierniczej [m/min]	980
Gramatura papieru [g/m ²]	75 ± 1
Suchość końcowa papieru [%]	96 ± 2
Współczynnik wyprzedzenia sita,-	0,988
Początkowa smarność masy papierniczej [°SR]	26
Stężenie masy we wlewie [%]	0,45
Przewodność właściwa wody świeżej [μS/cm]	400
Przewodność właściwa wody z masy włóknistej [μS/cm]	1500
ChZT wody świeżej [mg O ₂ /dm ³]	100
ChZT wody z masy włóknistej [mg O ₂ /dm ³]	2000
Objętość kadzi I wody podsitowej [m ³]	70
Objętość kadzi II wody podsitowej [m ³]	40

W oparciu o powyższe rozważania wykonano przykładowe analizy wpływu kilku wybranych czynników technologicznych na równowagę technologiczną modelowanego układu wodno-masowego maszyny papierniczej z uwzględnieniem najważniejszych wskaźników charakteryzujących poszczególne równowagi cząstkowe, jak również podstawowe właściwości produktu. Najważniejsze parametry wejściowe modelu zawarto w tabeli 6.1. Wyniki przeprowadzonych analiz są przedstawione poniżej.

6.1. Wpływ ograniczania zużycia wody świeżej na równowagę masową i fizykochemiczną w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej

Jednym z głównych czynników, który znacząco wpływa na równowagę masową i fizykochemiczną układu technologicznego maszyny papierniczej jest zmniejszanie jednostkowego zużycia wody świeżej. W celu zniwelowania ewentualnych skutków negatywnych tej operacji podejmuje się odpowiednie kroki, aby dostosować układ do nowej równowagi technologicznej. Skuteczność tych działań w dużej mierze jest uzależniona od znajomości warunków końcowych, czyli jakie będą nowe wartości określonych parametrów równowagi technologicznej i po jakim czasie zostaną one osiągnięte. Najszybszą i najtańszą metodą uzyskania tych informacji jest przeprowadzenie symulacji.

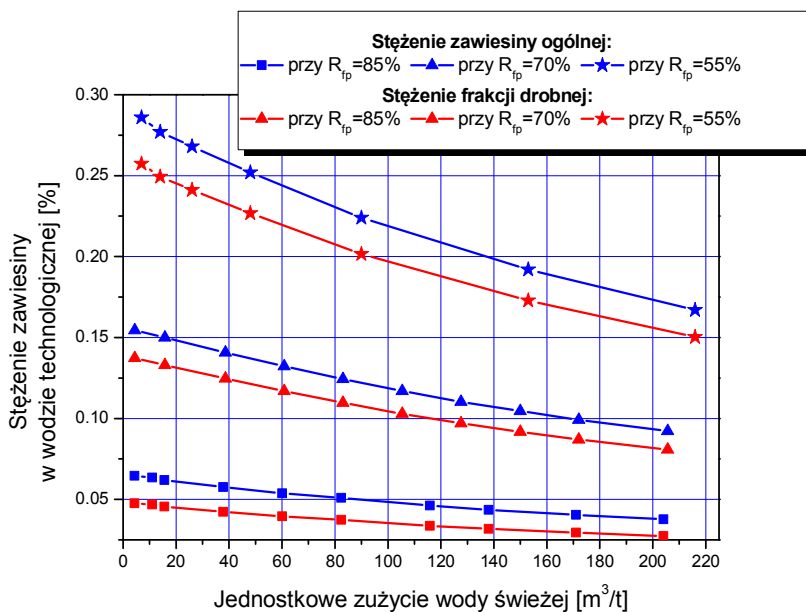
W niniejszym przykładzie zastosowano początkowe jednostkowe zużycie wody świeżej równe $220 \text{ m}^3/\text{t}$ produktu, co praktycznie odpowiada pracy modelowanego układu przy zupełnie otwartym obiegu wodnym. Mimo, iż obecnie w przemyśle raczej już takich wartości się nie spotyka, celem było tu pokazanie w możliwie dużym zakresie zmian, jakie zachodzą podczas ograniczania zużycia wody świeżej.

W kolejnych symulacjach obniżano wskaźnik jednostkowego zużycia wody świeżej poprzez zmniejszenie natężenia przepływu wody świeżej do układu. Każda zmiana była dokonywana w momencie, kiedy wszystkie wskaźniki charakteryzujące odpowiednie równowagi cząstkowe były już ustabilizowane.

Równowaga masowa w przedstawionych badaniach była charakteryzowana stężeniem zawiesiny całkowitej oraz stężeniem frakcji drobnej w I wodzie podsitowej modelowanego układu technologicznego. Zmiany tych parametrów pokazano na rys. 6.1.1.

Przebieg uzyskanych krzywych wskazuje, że wraz z malejącym jednostkowym zużyciem wody świeżej przyrost zarówno ilości zawiesiny ogólnej, jak i ilości frakcji drobnej w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej odbywał się stosunkowo łagodnie, jednakże przeprowadzona przy pomocy programu Origin próba dopasowania funkcji dla uzyskanych wyników wykazała, że zmiany te mają charakter wykładniczy. Dynamika przebiegu uzyskanych krzywych oraz wartości ilościowe były uzależnione nie tylko od jednostkowego zużycia wody świeżej, ale także od zastosowanej retencji pierwszego przejścia. Przy tym samym jednostkowym zużyciu wody świeżej wyższa retencja oznaczała mniejsze stężenie zawiesiny w wodzie obiegowej i odpowiednio mniejszą ilość frakcji drobnej w tej zwieszynie. Przykładowo, w badanym zakresie jednostkowego zużycia wody świeżej odnotowano przy retencji $R_{fp} = 85\%$ 1,6-krotny wzrost stężenia zawiesiny, przy retencji $R_{fp} = 70\%$ końcowa wartość stężenia zawiesiny w wodzie obiegowej stanowiła krotność 1,75 wartości początkowej, zaś przy $R_{fp} = 55\%$ końcowa wartość omawianego parametru była większa 1,85 razy. Są to wartości znaczne, czego potwierdzeniem może być następujący

przykład: w omawianym przypadku, przy $R_{fp} = 70\%$ i $JZW = 80 \text{ m}^3/\text{t}$ (co stanowi wartości typowe dla procesu prowadzonego ok. 10-15 lat temu), stężenie frakcji drobnej w wodzie technologicznej wynosiło $0,109\%$, czyli $1090 \text{ mg}/\text{dm}^3$. Stężenie to, przy obniżeniu jednostkowego zużycia wody świeżej do $4 \text{ m}^3/\text{t}$ wzrosło do poziomu $0,137\%$ (czyli $1370 \text{ mg}/\text{dm}^3$). Ponieważ sama maszyna papiernicza potrzebuje określoną, w przybliżeniu stałą ilość wody, w każdym z przypadków natężenie odpływu nadmiaru wody technologicznej do II obiegu wodnego było identyczne (w tym konkretnym przypadku wynosiło ono $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$). W konsekwencji, ilość zawiesiny kierowana do układu oczyszczania wzrosła o $280 \text{ mg}/\text{dm}^3$. Przyjmując, że maszyna papiernicza działa 24 h/dobę przez ok. 300 dni w roku, daje nam to dodatkowy ładunek do usunięcia z wody technologicznej równy 12 tonom substancji stałej na dobę i 3629 tonom w ciągu roku.

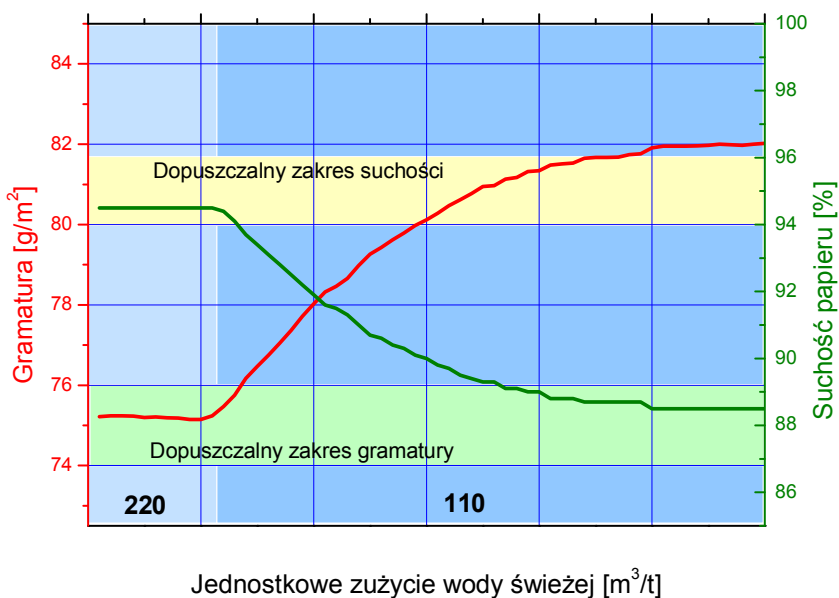


Rys. 6.1.1. Zmiany stężenia zawiesiny ogólnej i frakcji drobnej w wodzie obiegowej w wyniku zmniejszania jednostkowego zużycia wody świeżej w układzie technologicznym maszyny papierniczej przy różnych wartościach retencji pierwszego przejścia (symulacja)

Można wnioskować, że przy wyższych wartościach retencji przyrost ilości frakcji zawiesiny ogólnej i drobnej w wodzie obiegowej będzie wolniejszy, a biorąc pod uwagę wartości bezwzględne, zmiany te będą miały mniejszy wpływ na równowagę masową w układzie technologicznym i tym samym będą stanowiły mniejsze zagrożenie dla utrzymania właściwego przebiegu procesu. Dla analogicznego przykładu, jak ten przytoczony powyżej, obniżenie JZW

z $80 \text{ m}^3/\text{t}$ do $4 \text{ m}^3/\text{t}$, ale przy $R_{fp} = 85\%$ spowoduje, że ilość zawiesiny kierowana do układu oczyszczania wzrośnie tylko o $100 \text{ mg}/\text{dm}^3$, co (przy wcześniejszych założeniach) daje „tylko” dodatkowe 1300 ton substancji stałych rocznie, koniecznych do usunięcia wraz z nadmiarem wody technologicznej.

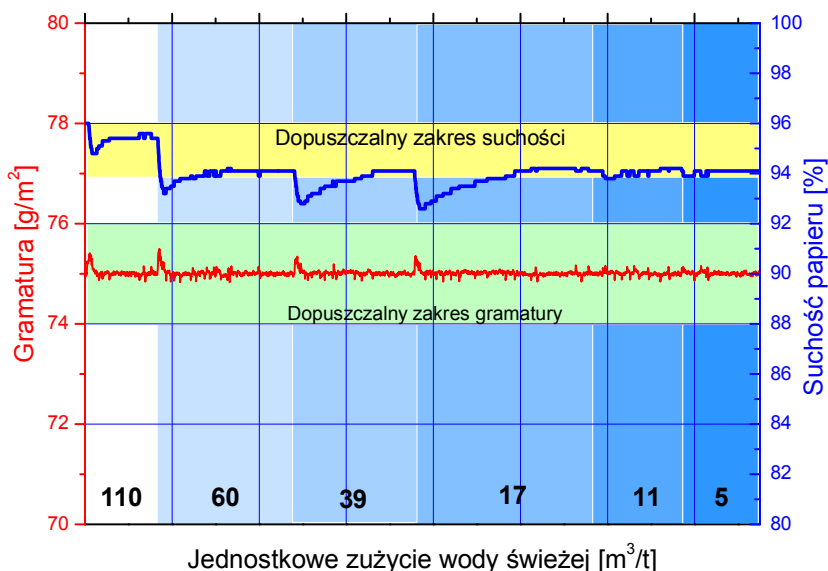
Trzeba też pamiętać, że ogólny wzrost ilości cząstek stałych w obiegu wodnym wpływa znacząco na parametry wytwarzanego papieru. Rys. 6.1.2 pokazuje wpływ zmian stężenia zawiesiny w wodzie obiegowej na zmiany dwóch najważniejszych i najbardziej podstawowych wskaźników jakościowych wytworu papierniczego: gramatury i suchości końcowej. Oba te parametry muszą być utrzymywane w określonych granicach warunkujących uzyskanie produktu zgodnego z oczekiwaniami odbiorcy. Na rysunku 6.1.2 granice dopuszczalnych odchyień są zaznaczone kolorami: zielonym dla gramatury i jasnożółtym dla suchości papieru.



Rys. 6.1.2. Wpływ zmiany jednostkowego zużycia wody świeżej na gramaturę i suchość końcową produkowanego papieru przy wyłączonych układach sterowania procesem (symulacja)

Okazuje się, że zmiana równowagi masowej spowodowana obniżeniem wskaźnika JZW z $220 \text{ m}^3/\text{t}$ do $110 \text{ m}^3/\text{t}$ spowodowała zmianę obu badanych parametrów. Na skutek wzrostu stężenia zawiesiny nastąpił wzrost gramatury i spadek suchości końcowej. Obie zmiany były na tyle duże, że przekroczyły dopuszczalne granice, co oznacza, że w warunkach przemysłowych taki papier musiałby być potraktowany jako tzw. brak własny. Znaczny wpływ stężenia zawiesiny krążącej w wodach obiegowych maszyny papierniczej oraz zagrożenia związane z niestabilnością tego parametru (jego wzrost lub spadek może być

wywołany także innymi czynnikami, np. zmianą retencji na sicie) wymusza wprowadzanie odpowiednich układów automatyki, które są w stanie korygować zmiany parametrów jakościowych. Sytuację tę przedstawiono na rys. 6.1.3.

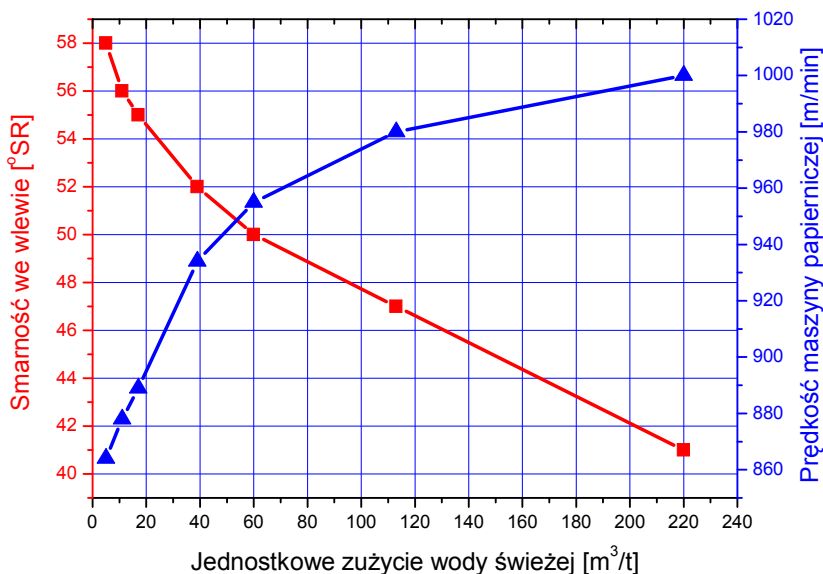


Rys. 6.1.3. Wpływ układów automatycznego sterowania procesem na gramaturę i suchość końcową produkowanego papieru podczas ograniczania jednostkowego zużycia wody świeżej (symulacja)

Na rysunku tym pokazano, że istnieje możliwość zmniejszenia niekorzystnego wpływu zmian zachodzących w równowadze masowej, jednakże korekta ta musi być okupiona odpowiednimi zmianami innych parametrów technologicznych. W warunkach rzeczywistych obniżenie gramatury jest możliwe poprzez korektę otwarcia tzw. zaworu gramatury (zaworu, którym dozuje się masę papierniczą bezpośrednio do części stałej maszyny papierniczej).

Obniżenie wilgotności wstęgi papierniczej może natomiast odbyć się poprzez zwiększenie wydajności sekcji suszącej (np. poprzez zwiększenie otwarcia zaworów doprowadzających parę). W przypadku, kiedy maszyna papiernicza pracuje już z maksymalną wydajnością (co jest rozwiązaniem optymalnym z punktu widzenia ekonomii produkcji) i nie można uzyskać większej suchości końcowej wstęgi, konieczne jest zwiększenie czasu przebywania w strefie odwadniania i suszenia. Musi odbyć się to poprzez zmniejszenie ogólnej wydajności maszyny papierniczej, czyli obniżenie jej prędkości. Sytuację tę ilustruje rys. 6.1.4. W trakcie trwania symulacji, wraz ze zmniejszającym się dodatkiem wody świeżej i wynikającym z tego wzrostem ilości frakcji drobnej w masie papierniczej (wyrażonej jako wzrost smarności we wlewie), układ automatycznej optymalizacji prędkości był zmuszony do systematycznego obniżania prędkości

kości maszyny papierniczej. Przy zmniejszeniu jednostkowego zużycia wody świeżej z 220 m³/t do 5 m³/t prędkość maszyny papierniczej obniżyła się z 980 m/min do ok. 860 m/min. Spadek prędkości był tym większy, im mniejszy był wskaźnik JZW.

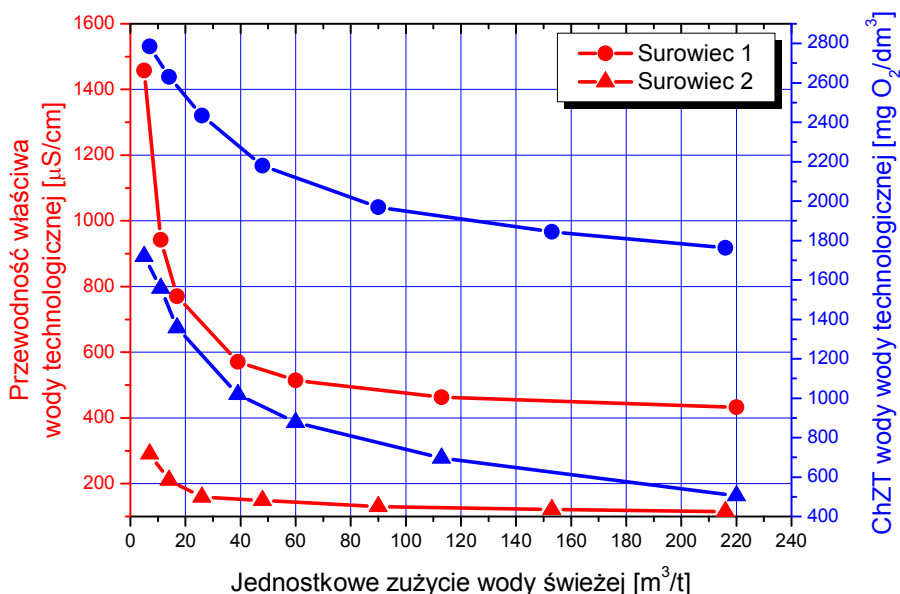


Rys. 6.1.4. Wpływ jednostkowego zużycia wody świeżej na smarność (zdolność do odwadniania) masy papierniczej i wydajność maszyny papierniczej (symulacja)

Efektom działania programu symulacyjnego były również dane dotyczące zmian zachodzących w równowadze fizykochemicznej pod wpływem jednostkowego zużycia wody świeżej. Wyniki te przedstawiono na rys. 6.1.5. Dla każdego z parametrów opisujących stan wody technologicznej wykonano dwie identyczne symulacje, ale przy różnych wartościach wejściowych parametrów opisujących ładunek substancji rozpuszczalnych (co odpowiada różnym rodzajom surowca włóknistego oraz różnej jakości wody świeżej).

Przed wszystkim można stwierdzić, że charakter uzyskanych krzywych jest zgodny z wcześniejszymi wynikami badań laboratoryjnych. Przyrost zarówno organicznych, jak i nieorganicznych substancji rozpuszczalnych w omawianym układzie technologicznym posiadał charakterystykę wykładniczą. Jednakże w zależności od jakości surowców wprowadzanych do procesu, wartości bezwzględne omawianych wskaźników (przy danym jednostkowym zużyciu wody świeżej) będą się różnić. Również sam przebieg zmian tych wskaźników może wykazywać pewne różnice.

Przedstawione wyniki potwierdzają, że równowaga fizykochemiczna w układzie technologicznym maszyny papierniczej jest stanem niezwykle zindywidualizowanym, silnie zależnym od właściwości materiałów użytych w procesie.

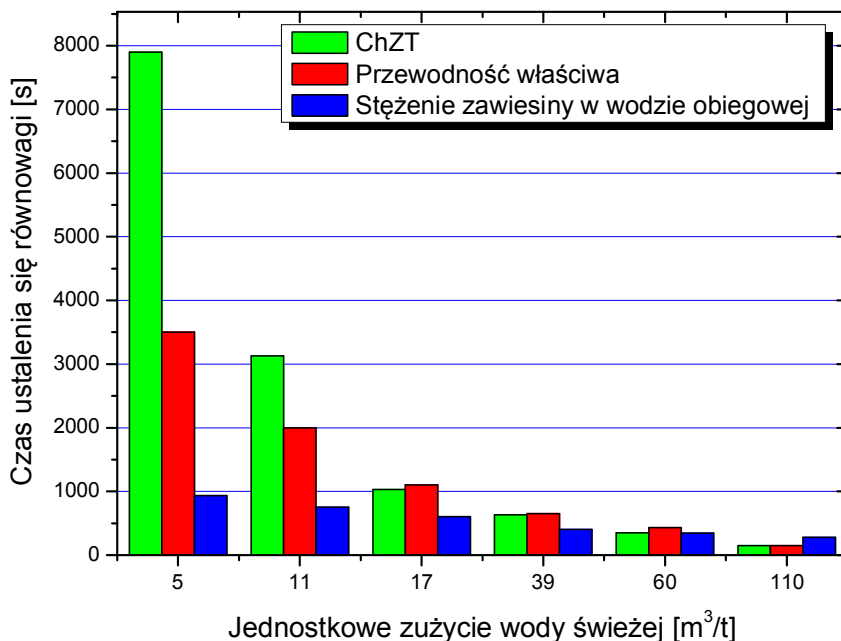


Rys. 6.1.5. Zmiany przewodności właściwej i wskaźnika ChZT w wodzie obiegowej układu technologicznego maszyny papierniczej w wyniku zmniejszania jednostkowego zużycia wody świeżej przy różnych właściwościach surowca włóknistego i wody świeżej (symulacja)

Na rys. 6.1.6 przedstawiono wyniki symulacji, w których wyznaczono czas ustalenia się nowej równowagi procesu dla każdego z modelowanych parametrów i przy danym jednostkowym zużyciu wody świeżej. Okazało się, że czas osiągnięcia kolejnych poziomów równowagi w modelowanym układzie technologicznym był tym dłuższy, im większy był stopień przymknięcia układu wodno-masowego. Dla najniższego, jednostkowego zużycia wody świeżej równego 5 m³/t czas ustalenia się stężenia zawiesiny w I wodzie podsitowej był równy ok. 15 minut, czas ustalenia się stałej wartości wskaźnika ChZT wynosił ponad 130 minut, zaś czas ustalenia się przewodności właściwej był krótszy i wyniósł ok. 60 minut.

Ponieważ wszystkie te wskaźniki wchodzi w skład ogólnej równowagi technologicznej można uznać, że czas ustalenia się całej równowagi w modelowanym układzie będzie równy najdłuższemu z wyznaczonych czasów. Zatem przy najniższym zastosowanym jednostkowym zużyciu wody świeżej czas ten wydłużył się do 130 minut. Warto dodatkowo zauważyć, że porównując czas opóźnień występujących w ciągu technologicznym w bezpośrednim otoczeniu maszyny papierniczej (rzędu kilku-kilkunastu minut) z czasem koniecznym do

ustalenia się równowagi masowej, wzrost czasu ustalania się równowagi masowej przy kolejnych, malejących wartościach jednostkowego zużycia wody świeżej jest stosunkowo nieznaczny. Natomiast w przypadku równowagi fizykochemicznej wydłużenie tego czasu wraz z malejącym jednostkowym zużyciem wody świeżej jest znacznie większe i może mieć istotny wpływ na przebieg szeregu działań, np. dozowania pomocniczych środków chemicznych. Ponadto jednym z bardziej znaczących skutków wydłużania się czasu stabilizacji równowagi w procesie jest utrudnienie kontroli i regulacji tego procesu.



Rys. 6.1.6. Czas ustalania się równowagi masowej oraz równowagi fizykochemicznej dla nieorganicznych i organicznych substancji rozpuszczonych w wyniku zmniejszania jednostkowego zużycia wody świeżej (symulacja)

6.2. Wpływ zmian retencji w sekcji formującej maszyny papierniczej na przebieg procesu wytwarzania papieru

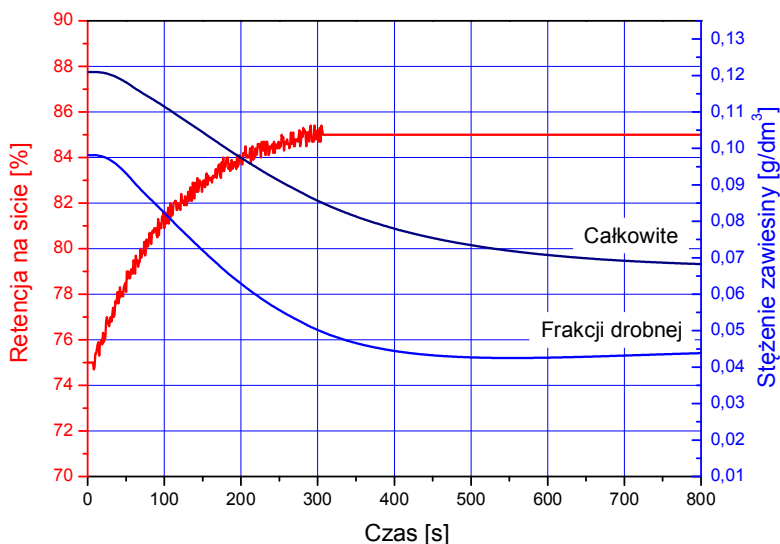
Innym, ilustrującym przydatność opracowanego modelu i programu symulacyjnego przykładem, jest analiza zmiany równowagi masowej w układzie technologicznym maszyny papierniczej pod wpływem zmiany równowagi fizykochemicznej wywołanej rozpoczęciem dozowania środków retencyjnych. Celem stosowania tych środków jest zwiększenie stopnia zatrzymania masy na sicie w sekcji formującej maszyny papierniczej, co jest uzasadnione ekonomicznie. W chwili obecnej praktycznie wszystkie nowoczesne maszyny papiernicze pracują z udziałem środków retencyjnych.

Newralgicznym momentem w procesie produkcyjnym jest rozpoczęcie dozowania środka retencyjnego. Zgodnie z równaniami 2.5 i 2.6 wzrost retencji na sicie musi spowodować zmniejszenie ilości cząstek odpływających z wodą podsitową do I i II obiegu wodnego. Ponieważ I woda podsitowa jest wykorzystywana do rozcieńczania masy we wlewie, to następstwem mniejszej zawartości zawiesiny w tej wodzie powinno być zmniejszenie smarności we wlewie i pewna poprawa zdolności do odwadniania formującej się wstęgi papierniczej.

Zmiana stężenia zawiesiny w I wodzie podsitowej jest oznaką zmiany równowagi masowej w układzie, zatem cała ta sytuacja może być rozważana jako wprowadzone do układu technologicznego zaburzenie. W odpowiedzi układ ten, poprzez odpowiednią reakcję systemów automatycznego sterowania, będzie dążył do osiągnięcia nowej równowagi. Dopóki jednak to nie nastąpi, to ma się do czynienia ze stanem przejściowym, który może powodować zakłócenia w prawidłowym przebiegu procesu.

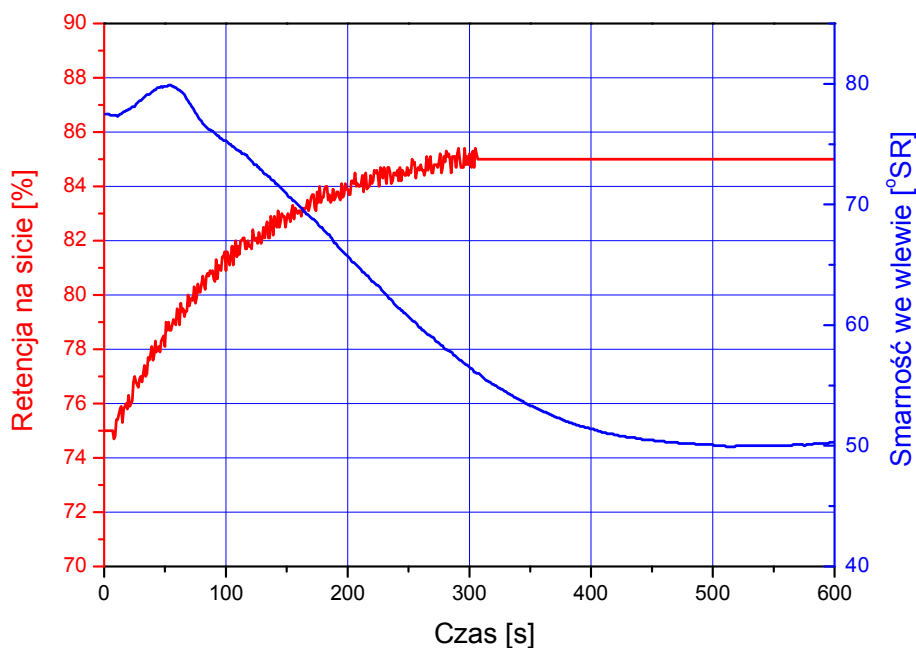
Pomimo udowodnionej skuteczności środków retencyjnych, to z praktyki przemysłowej znane są sytuacje, kiedy rozpoczęcie dozowania tych środków powodowało efekt odwrotny od wyżej opisywanego. Zamiast oczekiwanej poprawy odwadnialności wstęgi papierniczej następowało obniżenie tego parametru. W rezultacie, czasami wysuwano wnioski o nieskuteczności danej substancji, czego następstwem była decyzja o wycofaniu dozowania środka.

Wyniki uzyskane w trakcie przeprowadzania symulacji opisywanej sytuacji pozwalają na wyjaśnienie zjawisk zachodzących podczas tego procesu.



Rys. 6.2.1. Zmiany stężenia zawiesiny całkowitej oraz frakcji drobnej w I wodzie podsitowej podczas zmiany retencji na sicie formera maszyny papierniczej

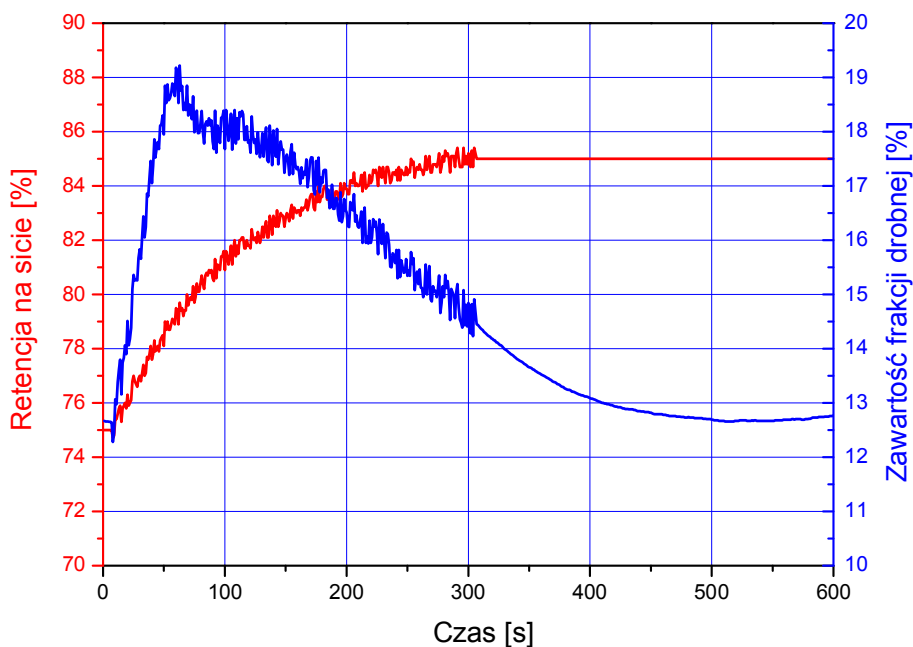
Rys. 6.2.1 przedstawia zmiany stężenia zawiesiny całkowitej oraz frakcji drobnej w I wodzie podsitowej podczas wzrostu retencji na sicie maszyny papierniczej. Zgodnie z przewidywaniem, zarówno stężenie całkowite, jak i stężenie frakcji drobnej maleje, co oznacza, że woda podsitowa zawracana do produkcji powinna w mniejszym stopniu wpływać na przyrost smarności (a tym samym obniżenie odwadniałości) masy papierniczej. Wykres na rys. 6.2.2, na którym pokazano zmiany smarności we wlewie maszyny papierniczej na skutek zmiany retencji na sicie, wskazuje, że w początkowej fazie wraz z rosnącą retencją następuje wzrost smarności we wlewie, a następnie obniżenie tego wskaźnika. Ten początkowy, stosunkowo niewielki, wzrost można wytłumaczyć tym, że układ technologiczny posiadał pewną bezwładność spowodowaną określoną, niezerową objętością systemu doprowadzania masy do wlewu. W systemie zalegały pewne ilości masy papierniczej bogate we frakcję drobną, co wynikało z wcześniejszej równowagi masowej. Zmiana równowagi masowej spowodowała, że stopniowo zaczęły być one usuwane z układu. Po usunięciu nadmiaru frakcji drobnej smarność we wlewie zaczęła się obniżać.



Rys. 6.2.2. Zmiany smarności we wlewie maszyny papierniczej na skutek zmiany retencji na sicie formera maszyny papierniczej

Przedstawiona na rys. 6.2.3 analiza ilości frakcji drobnej zatrzymującej się we wstędze papierniczej wskazuje, że smarność we wlewie nie jest w tym przypadku miarodajnym wskaźnikiem zdolności do odwadniania wstęgi papierniczej. Jak widać z tego wykresu, wraz ze wzrostem retencji następuje wzrost

zawartości frakcji drobnej we wstędze papieru, pomimo że w tym samym czasie smarność we wlewie zaczyna się już obniżać! Jest to oczywiście efekt zmiany równowagi masowej – można stwierdzić, że układ „oczyszcza się” poprzez usuwanie nadmiaru frakcji drobnej, która zostaje zatrzymana we wstędze papierniczej. Jednak konsekwencją tego faktu może być „niezrozumiałe” zjawisko, że pomimo obniżania się smarności masy papierniczej następuje dalsze pogorszenie odwadnialności samej wstęgi papierniczej. W miarę wzrostu retencji, nadmiar frakcji drobnej zostaje jednak ostatecznie wydzielony. Po osiągnięciu więc maksymalnego stężenia frakcji drobnej we wstędze następuje stopniowe obniżanie się jej ilości, przy czym można zauważyć, że końcowa zawartość frakcji drobnej we wstędze papierniczej jest mimo wszystko nieco większa od wartości początkowej. Oznacza to, że mimo obniżenia się stężenia frakcji drobnej w wodzie obiegowej, zdolność do odwadniania wstęgi papierniczej może ulec pewnemu pogorszeniu.



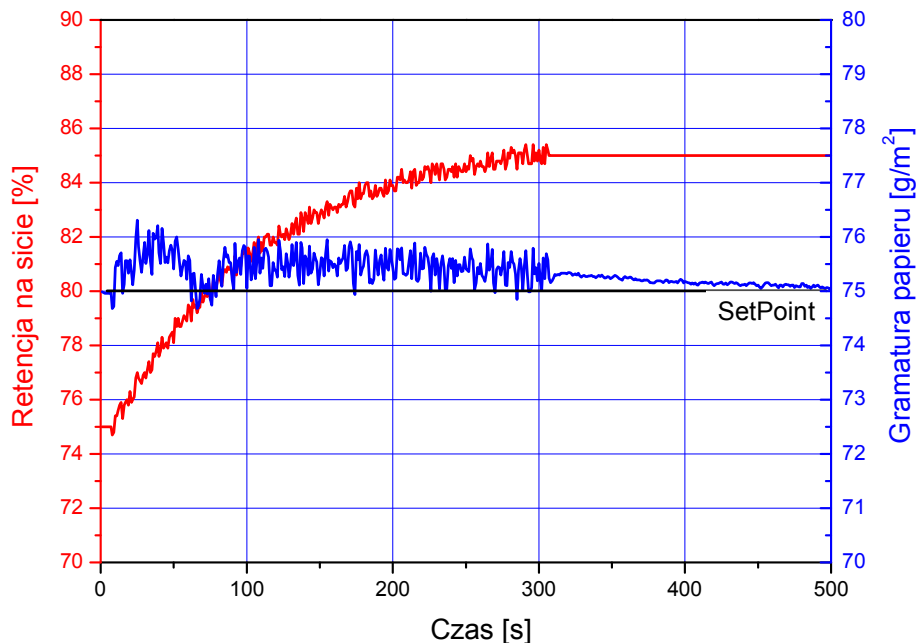
Rys. 6.2.3. Zmiany zawartości frakcji drobnej w formowanej wstędze papierniczej podczas zmiany retencji na sicie formera maszyny papierniczej

Warto też zwrócić uwagę, że czas ustalania się nowego stężenia frakcji drobnej we wstędze papierniczej jest dłuższy niż czas samej zmiany retencji.

Konieczne jest też podkreślenie, że w trakcie wykonywania powyższej symulacji był włączony układ automatycznej regulacji gramatury. Oznacza to, że gramatura papieru powinna być utrzymywana na stałym poziomie. Pomimo tego, że układ automatycznej regulacji nie był w stanie w pełni zapewnić stałości

gramatury, to i tak zmiany te były na tyle niewielkie, że trudno byłoby na ich podstawie wyjaśnić kłopoty z odwadnianiem wstęgi papieru (rys. 6.2.4). W warunkach rzeczywistych obserwowane zaburzenia wywołane zmianą retencji będą najprawdopodobniej również w dużym stopniu uzależnione od skuteczności działania systemów automatyki.

Przedstawione w zaprezentowanym przypadku wyniki potwierdzają, że zmiana równowagi fizykochemicznej może być czynnikiem, który spowoduje zmianę równowagi masowej w układzie technologicznym.



Rys. 6.2.4. Zmiany zawartości frakcji drobnej w formowanej wstędze papierniczej podczas zmiany retencji na sicie formera maszyny papierniczej

Przedstawione wyżej wybrane aspekty zmian zachodzących w modelowanych równowagach cząstkowych procesu produkcji papieru stanowią skromny przykład możliwości opracowanego narzędzia. Stworzony symulator pozwala na ilościowy opis wielu różnych zjawisk zachodzących w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej także tych, które dotychczas były opisywane tylko w sposób jakościowy.

Stworzony model nie jest pozbawiony kilku wad. Przede wszystkim jego działanie zostało tylko częściowo sprawdzone w warunkach przemysłowych, co wynika głównie z dużych kosztów takiego przedsięwzięcia (koszt „wynajęcia” opisywanej maszyny papierniczej do tego typu badań został wyliczony na ok. 200.000 PLN za 12 godzin produkcji). W modelu odczuwa się brak bilansu

cieplnego, który nie tylko pokazałby zmiany temperatury w modelowanym układzie, ale pozwoliłby też na dokładniejszy opis zjawiska odwadniania wstęgi papierniczej w sekcji formującej, jak również rozszerzyłby możliwości matematycznego opisu uwalniania się substancji rozpuszczalnych z surowca włóknistego. W przypadku modelu równowagi fizykochemicznej nie uwzględniono zjawiska sorpcji substancji rozpuszczonych na włóknach wstęgi papierniczej, nie uwzględniono także efektów związanych z wprowadzaniem do procesu dodatków masowych oraz pomocniczych środków chemicznych, często stosowanych w technologii papieru. Ponadto w modelu występuje wiele równań empirycznych, więc trzeba się liczyć z tym, że o ile forma tych równań może być uniwersalna, to występujące w nich współczynniki najprawdopodobniej mogą nie znaleźć zastosowania w innych układach technologicznych.

Na koniec warto zaznaczyć, że stworzony symulator ma otwartą strukturę, która pozwala na łatwe wprowadzanie w niej zmian. Zatem można oczekiwać, że wszystkie wyżej wymienione czynniki będą sukcesywnie dodawane.

WNIOSKI OGÓLNE

Część „mokra” maszyny papierniczej wraz z przyległym do niej układem wodno-masowym należy do bardzo złożonych systemów dynamicznych. Wpływają na to: duża liczba parametrów wejściowych i wyjściowych (system typu MIMO), wzajemne powiązania (sprzężenia) pomiędzy poszczególnymi parametrami procesu, obecność licznych strumieni cyrkulacyjnych i zbiorników buforowych, nieliniowość parametrów wejściowych oraz nieliniowy przebieg zmian szeregu parametrów w procesie. Przewidywanie zachowanie się takiego układu bez zastosowania odpowiednich narzędzi jest zatem bardzo trudne.

W niniejszej pracy podjęto próbę modelowego opisu zachowania się wybranych równowag cząstkowych (równowagi wodnej, masowej i fizykochemicznej) występujących w układzie technologicznym maszyny papierniczej w powiązaniu z właściwościami surowca, produktu, zdolnością ruchową maszyny papierniczej oraz zmianami jednostkowego zużycia wody świeżej. Rozważania teoretyczne i wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych posłużyły do opracowania narzędzia w postaci programu komputerowego umożliwiającego jakościową i ilościową analizę zmian zachodzących w badanych równowagach cząstkowych.

Na podstawie uzyskanych wyników badań doświadczalnych i wykonanych symulacji komputerowych stwierdzono, co następuje:

1. Właściwości surowca włóknistego stosowanego w produkcji (m.in. zawartość frakcji drobnej, ilość substancji rozpuszczalnych, podatność na mielenie) stanowią jeden z podstawowych czynników, który determinuje stan równowagi masowej i fizykochemicznej układu technologicznego. Ze względu na zróżnicowanie tych właściwości w obrębie różnych rodzajów surowców nie ma możliwości opisu ich w sposób uogólniony. Właściwości surowca muszą być zatem każdorazowo opisywane w sposób indywidualny za pomocą równań empirycznych.
2. Na stan równowagi dynamicznej w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej mają wpływ indywidualne ustawienia parametrów procesu technologicznego wynikające z wymogów stawianych produkcji danego asortymentu papieru. Do tych parametrów należą m.in. współczynnik wyprzedzenia sita, prędkość maszyny i stężenie masy papierniczej. Zatem nawet dla tego samego surowca, ale przy różnych nastawach w procesie produkcyjnym, poszczególne wskaźniki kryterialne równowag cząstkowych mogą przyjmować różne wartości.
3. Równowaga dynamiczna w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej jest stanem wysoce zindywidualizowanym, a zatem porównywanie i wyciąganie szczegółowych wniosków oraz przenoszenie wyników pracy jednego układu technologicznego do innego układu może być ryzykowne i prowadzić do niewłaściwych skutków końcowych. Fakty te uzasadniają potrzebę stosowania symulatorów komputerowych jako tańszej i bezpieczniejszej alternatywy dla testów i wprowadzania zmian w rzeczywistym układzie technologicznym.

4. W przypadku obniżania jednostkowego zużycia wody świeżej stwierdzono, że niezależnie od rodzaju stosowanego surowca włóknistego, wraz ze zmniejszaniem wskaźnika JZW, przyrost ilości substancji stałych (zawiesiny) oraz substancji rozpuszczalnych w cyrkulujących wodach obiegowych następuje w sposób wykładniczy. Przyrost ten można wyrazić za pomocą funkcji:

$$y = y_0 + a * e^{\frac{-JZW}{b}}$$

Symbol „y” odpowiada parametrowi, który charakteryzuje daną równowagę cząstkową. Rodzaj surowca włóknistego wpływa na konkretną wartość liczbową parametru, który charakteryzuje daną równowagę cząstkową. W powyższym równaniu opisują to współczynniki y_0 , a i b . Czynniki y_0 jest wartością początkową danego parametru, zależną przede wszystkim od rodzaju masy papierniczej. Powyższy wzór pozwala na przybliżone, ilościowe oszacowanie stanu danej równowagi cząstkowej przy określonym jednostkowym zużyciu wody świeżej.

5. Opracowany program symulacyjny umożliwia dokładniejsze, ilościowe określenie stanu równowagi technologicznej panującej w badanym układzie technologicznym oraz pozwala wykonać ilościową analizę zmian zachodzących w tej równowadze, szczególnie w zależności od jednostkowego zużycia wody świeżej. Do tego celu wymagana jest jednak znajomość dodatkowych parametrów początkowych procesu technologicznego (właściwości materiałów, parametrów samej maszyny papierniczej oraz parametrów układu technologicznego).

6. Opracowany program symulacyjny pozwala na wyznaczenie czasu potrzebnego do osiągnięcia nowej równowagi technologicznej w badanym układzie. Znajomość czasu stabilizacji poszczególnych równowag cząstkowych w badanym układzie technologicznym w danych warunkach jego pracy pozwala na zwiększenie jego przewidywalności, a tym samym poprawia możliwości jego kontroli. Wykonane symulacje pozwalają wnioskować, że wraz ze zmniejszeniem jednostkowego zużycia wody świeżej następuje wykładnicze wydłużenie się czasu potrzebnego do ustalenia się nowej równowagi technologicznej w badanym układzie. Dla zastosowanych parametrów początkowych procesu (uzyskanych z istniejącego układu rzeczywistego) najszybciej następowało stabilizowanie się równowagi masowej, natomiast najdłużej ustalała się równowaga fizykochemiczna związana z organicznymi substancjami rozpuszczalnymi.

7. Opracowany program symulacyjny umożliwia analizowanie nieustalonych stanów przejściowych będących odpowiedzią układu technologicznego na wprowadzane w nim zmiany. Przykładowo: wykonana analiza zmiany równowagi masowej pod wpływem wzrostu retencji na sicie maszyny papierniczej pozwoliła wyjaśnić występujące w układach rzeczywistych chwilowe zjawisko negatywne objawiające się pogorszeniem zdolności do odwadniania formowanej

wstęgi papieru. Stwierdzono, że efekt ten jest związany ze wzrostem stopnia zatrzymania w formowanej wstędze papieru nadmiaru frakcji drobnej, która przy niskiej retencji krąży w dużych ilościach w wodach obiegowych. Po ustaleniu się nowej równowagi masowej następowała oczekiwana, stopniowa poprawa zdolności do odwadniania formowanej wstęgi papieru.

8. Wykonana statyczna weryfikacja opracowanego modelu i programu symulacyjnego oraz wyniki jakościowe uzyskane w trakcie przeprowadzonych symulacji dynamicznych wskazują, że opracowany model odwzorowuje zmiany zachodzące w badanym procesie technologicznym z zadowalającą dokładnością.

WNIOSKI SZCZEGÓŁOWE

Podczas analizowania równowagi technologicznej układu technologicznego maszyny papierniczej należy uwzględnić, że poszczególne równowagi cząstkowe są jednocześnie uzależnione od co najmniej kilku parametrów. Równowaga masowa w badanym układzie technologicznym jest uzależniona jednocześnie od: rodzaju i stężenia masy papierniczej, stężenia tej masy po rozcieńczeniu we wlewie maszyny papierniczej, retencji w sekcji formującej i jednostkowego zużycia wody świeżej. Przy założeniu, że rodzaj masy papierniczej i jej stężenie na poszczególnych etapach procesu technologicznego wynikają ze specyfiki wytwarzania danego rodzaju asortymentu i w trakcie produkcji są zwykle utrzymywane na określonym, stałym poziomie, to głównymi parametrami, które mogą podlegać zmianom będą: retencja w sekcji formującej i jednostkowe zużycie wody świeżej. Przykładowo: stwierdzono, że dla stężenia we wlewie równego 0,42% i retencji $R_{fp} = 85\%$, przy wartości $JZW = 185 \text{ m}^3/\text{t}$, stężenie zawiesiny w wodzie obiegowej wynosiło 0,04%, a smarność masy we wlewie 43°SR . W tych samych warunkach, przy zmianie jednostkowego zużycia wody świeżej do poziomu $4,5 \text{ m}^3/\text{t}$, stężenie zawiesiny w wodzie obiegowej wynosiło 0,065%, co jest zmianą stosunkowo niedużą. Natomiast smarność masy papierniczej we wlewie (utożsamiana z jej zdolnością do odwadniania) wzrosła o ponad 10 jednostek do wartości $55,5^\circ\text{SR}$. Wzrost smarności był związany ze zmianą ilości frakcji drobnej w zawieszynie w wodzie obiegowej. Przy zachowaniu stałego stężenia we wlewie równego 0,42%, zmiana retencji do wartości 75% spowodowała, że przy $JZW = 185 \text{ m}^3/\text{t}$ stężenie zawiesiny w wodzie obiegowej wynosiło 0,075%, a smarność we wlewie była równa 62°SR . Obniżenie jednostkowego zużycia wody świeżej do wartości $4,5 \text{ m}^3/\text{t}$ spowodowało wzrost stężenia zawiesiny w wodzie obiegowej do poziomu 0,113%, zaś smarność we wlewie wzrosła do ponad 79°SR , co praktycznie uniemożliwiło utrzymanie zdolności ruchowej w symulowanym procesie.

Czas ustalania się równowagi masowej w układzie technologicznym danej maszyny papierniczej zależy w dużej mierze od wielkości natężeń przepływu strumieni wody i masy występujących w tym układzie oraz od pojemności tego układu. Przy zachowaniu stałych wartości tych parametrów stwierdzono, że przy jednostkowym zużyciu wody świeżej równym $220 \text{ m}^3/\text{t}$ czas ustalania się określonego stężenia wody obiegowej wynosił ok. 5 minut, natomiast przy $JZW = 5 \text{ m}^3/\text{t}$ czas ten wydłużył się trzykrotnie. Zmiany stężenia organicznych i nieorganicznych substancji rozpuszczonych w wodzie obiegowej badanego układu technologicznego zależą również od szeregu czynników technologicznych, m.in: stężenia i rodzaju masy papierniczej, czasu przebywania danej masy papierniczej w układzie technologicznym oraz temperatury panującej w tym układzie. W przypadku badanych mas zarówno wzrost stężenia, wydłużanie czasu przebywania i wzrost temperatury powodowały zwiększenie ilości substancji rozpuszczonych w wodach technologicznych maszyny papierniczej, przy

czym zmiany te miały charakter wykładniczy. Stwierdzono ponadto, że substancje nieorganiczne uwalniały się z badanych mas papierniczych znacznie szybciej niż substancje organiczne. Ustalono, że z praktycznego punktu widzenia najbardziej użytecznym wskaźnikiem charakteryzującym kinetykę wydzielania się substancji rozpuszczalnych będzie czas t_{90} . Jest to czas, po którym z danej masy papierniczej wydzielą się 90% ogółu zawartych w niej substancji rozpuszczalnych, które w danych warunkach mogą przeniknąć do wody obiegowej. Stwierdzono, że w przypadku substancji nieorganicznych t_{90} był równy 45 minut, zaś dla substancji organicznych czas t_{90} był dłuższy i wynosił ok. 80 minut.

Zmiany zachodzące w równowadze fizykochemicznej w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej pod wpływem zmian jednostkowego zużycia wody świeżej charakteryzowały się znacznie większym zakresem wartości niż zmiany zachodzące w równowadze masowej. Zmiany przewodności właściwej w zakresie jednostkowego zużycia wody świeżej od 220 m³/t do ok. 40 m³/t były stosunkowo nieznaczne i wynosiły ok. 135 μS/cm. Poniżej JZW = 40 m³/t przewodność właściwa zaczynała gwałtownie przyrastać, aby przy JZW = 5 m³/t osiągnąć wartość równą 1451 μS/cm. Czas stabilizacji tego wskaźnika przy tak niskim zużyciu wody świeżej wzrósł z początkowej wartości ok. 2 minut do prawie 60 minut. W przypadku wskaźnika ChZT, różnica pomiędzy wartością początkową i końcową w zakresie jednostkowego zużycia wody świeżej od 220 m³/t do ok. 40 m³/t była znacznie większa. Wynosiła on ok. 440 mg O₂/dm³. Poniżej JZW = 40 m³/t przyrost był jeszcze większy: przy JZW = 5 m³/t wartość ChZT wynosiła 1447 mg O₂/dm³. Przy początkowym jednostkowym zużyciu wody świeżej równym 220 m³/t czas stabilizacji tego wskaźnika wynosił ok. 2 minuty, natomiast przy JZW = 5 m³/t wydłużył się do 130 minut.

Badania wykonywane w ramach tej pracy były wsparte przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantu habilitacyjnego nr N N209 022 139.

CHARAKTERYSTYKA ZAWODOWA AUTORA

Konrad Olejnik ukończył studia na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej w 1994 roku (specjalność: inżynieria papiernicza). Pracę magisterską pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Kazimierza Przybysza „Analiza komputerowego systemu sterowania procesem wytwarzania papieru w maszynie papierniczej” wykonał w Instytucie Papiernictwa i Poligrafii PŁ. Dla potrzeb realizacji pracy dyplomowej odbył specjalistyczną praktykę przemysłową w fabryce „Celuloza” S.A. w Świeciu (obecnie Mondi Świecie S.A.) oraz 2-tygodniową praktykę w firmie Measurex (obecnie Honeywell) w Austrii. W październiku tego samego roku rozpoczął pracę

w Instytucie Papiernictwa i Poligrafii PŁ na stanowisku asystenta. Od samego początku prowadził zajęcia laboratoryjne ze studentami oraz uczestniczył w realizacji szeregu naukowych prac badawczych dotyczących różnych zagadnień z zakresu technologii papieru. Badania te dotyczyły m.in. mielenia papierniczych mas włóknistych, możliwości poprawy właściwości użytkowych różnych rodzajów wytworów papierniczych, optymalizacji zużycia wody świeżej w papierni i optymalizacji gospodarki odpadami z przerobu makulatury. W 1999 roku odbył 2-miesięczny staż naukowy w Helsinki University of Technology w Finlandii. W 2002 roku obronił pracę doktorską „Badania efektywności procesu mielenia papierniczych mas włóknistych”, uzyskując tytuł doktora nauk technicznych z zakresu inżynierii chemicznej. Praca ta została wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Kazimierza Przybysza. Od 2003 roku jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Papiernictwa i Poligrafii Politechniki Łódzkiej. Po uzyskaniu stopnia doktora jego zainteresowania zawodowe zostały skoncentrowane w obrębie dwóch, głównych obszarów badawczych. Pierwszy dotyczy ogólnie poprawy zdolności papierotwórczej pierwotnych i wtórnych papierniczych mas włóknistych. Prace z tego zakresu obejmują: optymalizację procesu mielenia, badania nad swobodnym pęcznieniem włókien celulozowych oraz ocenę wpływu frakcji drobnej na właściwości masy włóknistej i produkowanego z niej papieru.

Drugi kierunek badań jest związany z poznawaniem i analizą pracy układu wodno-masowego i tzw. sekcji „mokrej” maszyny papierniczej. W szczególności badania te dotyczą skutków ograniczania zużycia wody świeżej w procesie produkcji papieru. W pracach z tego zakresu autor łączy laboratoryjne (analityczne) metody badawcze z komputerowym modelowaniem i symulowaniem zjawisk zachodzących w ciągu technologicznym maszyny papierniczej.

W trakcie swej pracy zawodowej, Konrad Olejnik odbył łącznie 10 zagranicznych staży i wizyt naukowych w różnych ośrodkach naukowo-badawczych

w Finlandii, Francji, Austrii, Słowacji i Turcji. Pracował m.in. w European Synchrotron Radiation Facility w Grenoble przy badaniach, w których wykorzystywano promieniowanie synchrotronowe do wykonywania tomografii papierniczych struktur włóknistych. Większość prac badawczych autora jest realizowana we współpracy z zakładami przemysłowymi. Działalność dydaktyczna autora po uzyskaniu stopnia doktora obejmowała m.in. zajęcia rachunkowe, projektowe i laboratoryjne z technologii papieru, zajęcia laboratoryjne z gospodarki wodno-ściekowej i technologii papierów specjalnych oraz wykłady i zajęcia laboratoryjne z automatyki i sterowania w przemyśle papierniczym. Realizował także wykłady w języku angielskim w Saimaa University

of Applied Sciences w Finlandii. Był promotorem 19 prac dyplomowych.

Konrad Olejnik jest autorem lub współautorem 63 prac naukowych, wśród których można wyszczególnić 9 publikacji w czasopismach znajdujących się na *Thomson Scientific Master Journal List*, 3 rozdziały w monografiach angielskojęzycznych i 2 podręczniki zawodowe napisane na zamówienie Ministerstwa Edukacji Narodowej. Recenzował również artykuły naukowe dla *BioResources* oraz *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. Jest rzeczoznawcą MEN w zakresie kształcenia w zawodzie „technik papiernictwa” oraz członkiem stowarzyszenia APPITA (The Technical Association of The Australian and New Zealand Pulp and Paper Industry).

LITERATURA

1. **Abubakr S.:** Fiber fractionation as a method of improving handsheet properties after repeated recycling, 1994 Recycling Symposium Proceedings, TAPPI Recycling Symposium, TAPPI Press, Atlanta, 309, 1994.
2. **Appling J.W., Cruickshank G.A., DeLong R.F., Herschler R.J., Humiston C.G., Martin R.B., Sanborn J.R., Shema B.F., Wiley A.J.:** Microbiology of pulp and paper, TAPPI Monograph Series No. 15, TAPPI, New York, 1955.
3. **Aquafit4use (praca zbiorowa):** Water quality demands in paper, chemical, food and textile companies, Raport wykonany w ramach programu Aquafit4use (7 Program Ramowego UE), 2010 (<http://www.aquafit4use.eu/userdata/file/Public%20results/AquaFit4use-water%20quality%20demands%20in%20paper-chemical-food-textile%20industry.pdf>).
4. **Austin P.:** Reducing Energy Consumption in Papermaking using Advanced Process Control and Optimisation, Engineering for a Low Carbon Future Seminar, University of Cambridge, London 3.02.2010.
5. **Backstrom M., Kolar M.C., Htun M.:** Characterisation of Fines from Unbleached Kraft Pulps and their Impact on Sheet Properties, Holzforschung, 62, 5, 546-550, 2008.
6. **Baker C.:** Refining Technology, Pira pulp and paper guide series, Pira Ltd. UK, 2000.
7. **Barber V.A., Scott G.M.:** Dynamic modeling of a paper machine, part I: programming and software development, TAPPI J., 6, 1, 11-17, 2007a.
8. **Barber V.A., Scott G.M.:** Dynamic modeling of a paper machine, part II: Evaluation of wet-end model dynamics, TAPPI J., 6, 2, 18-22, 2007b.
9. **Baldrian P., Valásková V., Merhautová V., Gabriel J.:** Degradation of lignocellulose by *Pleurotus ostreatus* in the presence of copper, manganese, lead and zinc. Res. Microbiol., 156: 670-676, 2005.
10. **Banerjee S., Yang R., Haynes R.D.:** Aggregation of colloidal material in recycling process water, TAPPI J., 8, 8, 19-23, 2009.
11. **Beecher A.E.:** Dynamic Modeling Techniques in the Paper Industry. TAPPI J. 46, 2, 117-120, 1963.
12. **Bellmann C. et al.:** Electrokinetic properties of Natural Fibres, Colloids and Surfaces, Physicochem. Eng. Aspects 267, 19-23, 2005.

13. **Biermann Ch.J.:** Handbook of Pulping and Papermaking – 2nd edition, Academic Press, 1996 ISBN: 0-12-097362-6.
14. **Blanco M.A., Negro C., Gaspar I., Tijero J.:** Slime problems in the paper and board industry. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 46:203-208, 1996.
15. **Bolmstedt J.:** Dynamic modelling of an activated sludge process at a pulp and paper mill, Master Thesis, Dept. of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund, Sweden, 2000.
16. **Bortolin G., Borg S., Gutman O.P.:** Modeling of the wet end part of a paper mill with Dymola. *Mathematics and Computers in Simulation* 65, 31-38, 2004.
17. **Bowers D.F.:** Effect of closed water system and cleaning procedures on corrosion of papermaking equipment. *TAPPI J.*, 60, 10, 57-62, 1977.
18. BREF Reference document for Pulp and Paper Industry:
<http://eippcb.jrc.es/reference/pp.html>
19. **Britt K.W.:** Mechanisms of retention during paper forming. *TAPPI J.*, 56, 10, 46-50, 1973.
20. **Britt K.W., Unbehend J.E.:** New methods for monitoring retention. *TAPPI J.*, 59, 2, 67-70, 1976.
21. **Britt K.W., Unbehend J.E., Shridharan R.:** Observations on water removal in papermaking, *TAPPI J.*, 69, 7, 76-79, 1986.
22. **Brun J., Delagoutte T., Carre B.:** Origins and effects of dissolved and colloidal materials, *Prog. Pap. Recycl.*, 17, 1, 12-21, 2007.
23. **Casey J.P. (ed.):** Pulp and Paper Chemistry and Technology, Vol. IV, John Wiley and Sons, New York, 1983.
24. **Chaudhary A., Gupta L.K., Gupta J.K., Banerjee U.C.:** Studies on slime-forming organisms of a paper mill-sludge production and its control, *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology* 18, 348-352, 1997.
25. CEPI Annual Statistics 2009:
<http://www.cepi.org/content/default.asp?pageid=102>
26. CEPI Sustainability Report 2009:
<http://www.cepi.org/content/Default.asp?PageID=4>
27. **Chen H., Park A., Heitmann J.A., Hubbe M.A.:** Importance of Cellulosic Fines Relative to the Dewatering Rates of Fiber Suspensions, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, 20, 9106-9112, 2009.

28. **Cole C.A., Hubbe M.A., Heitmann J.A.:** Water Release from Fractionated Stock Suspensions. 1. Effects of the Amounts and Types of Fiber Fines. *TAPPI J.*, 7, 7, 28-32, 2008.
29. **Davison R.:** Pulp and Paper Manufacture, Vol. 6: Stock Preparation, TAPPI Press, Atlanta, 1992.
30. **Delgado A.V., Gonzales-Caballero F., Hunter R.J., Koopal L.K., Lyklema J.:** Measurement and Interpretation of Electrokinetic Phenomena, *Pure Appl. Chem.*, 77, 10, 1753-1805, 2005.
31. **Droppo I.G., Leppard G.G., Liss S.N., Milligan T.G. (eds.):** Flocculation in Natural and Engineered Environmental Systems, CRC Press 2005, ISBN 1-56670-615-7.
32. **Eames, J.:** Modified Foil Blade Design Improves Forming Table Drainage, Turbulence, Weavexx Technical Bulletin 2009 (<http://www.xerium.com/weavexx/serviceSupport>).
33. **Ek M., Gellerstedt G., Henriksson G. (eds.):** Pulp and Paper Chemistry and Technology, Volume 2, Pulping Chemistry and Technology, by Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 10785 Berlin, 2009, ISBN 978-3-11-021341-6.
34. **Ek M., Gellerstedt G., Henriksson G. (eds.):** Pulp and Paper Chemistry and Technology, Volume 3, Paper Chemistry and Technology, by Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 10785 Berlin, 2009, ISBN 978-3-11-021343-0.
35. **Elliott A., Mahmood T.:** Whitewater (WW) quality and treatment options for closing value added WW loops, *Pulp Pap. Can.*, 108, 11, 26-31, 2007.
36. **Francis D.W., Towers M.T., Browne T.C.:** Energy Cost Reduction in the Pulp and Paper Industry – An Energy Benchmarking Perspective, PAPTAC Press, ISBN 0-662-66163-X, 2002.
37. **Gavelin N.G.:** Paper machine design and operation – descriptions and explanations, Angus Wilde, ISBN: 0-9694628-2-4, 1998.
38. **Graff S.:** Analyse de la distribution de matiere dans la partie humide d'une machine a papier. M.Sc. thesis, Ecole Polytechnique, Montreal, 1991.
39. **Granholt K., Su P., Harju L., Ivaska A.:** Study on desorption of Mn, Fe, and Mg from TMP and evaluation of the complexing strength of different chelating agents using side reaction coefficients, *Holzforschung* 63, 6, 785-790, 2009.
40. **Gudlauskis D.G.:** Whitewater system closure means managing microbiological buildup, *Pulp Pap. Can.*, 70, 3, 161-164, 1996.
41. **Han S.T.:** Retention of small particles in fiber mats, *TAPPI J.*, 47, 12, 782-787, 1964.

42. **Hatakeyama T., Nakamura K., Hatakeyama H.:** Studies on heat capacity of cellulose and lignin by differential scanning calorimetry, *Polymer*, 23, 11, 1801-1804, 1982.
43. **Hilbert H., Saner M., Bunk M.:** Continuous recording of the growth kinetics of interfacial deposits, *Paper Technol.*, 42, 4, 41-46, 2001.
44. **Holik H.:** Handbook of Paper and Board, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2006, ISBN: 3-527-30997-7.
45. **Hubbe M.A.:** Water and Papermaking. 1. Fresh Water Components, *Paper Technol.*, 48, 2, 18-24, 2007a.
46. **Hubbe M.A.:** Water and Papermaking. 2. White Water Components, *Paper Technol.*, 48, 3, 31-39, 2007b.
47. **Hubbe M.A., Heitmann J.A., Cole C.A.:** Water Release from Fractionated Stock Suspensions. 2. Effects of Consistency, Flocculants, Shear and Order of Mixing. *TAPPI J.*, 7, 8, 14-18, 2008.
48. **Huhtamaki M.:** Closing the Water Cycles – How Far Can We Go? *Paper Technol.*, 44, 10, 27-32, 2003.
49. **Hunter R.J.:** Foundations of Colloid Science, Oxford University Press, 1989, ISBN 0198551894.
50. **Jayme G.:** Mikro-Quellungsmessungen an Zellstoffen, *Wochenblatt für Papierfabrikation*, 6, 187-194, 1944.
51. **Jayme G., Buttell H.:** Über die Bestimmung und Bedeutung des Wasser-rückhaltevermögens (des WRV-Wertes) verschiedener gebleichter und ungebleichter Zellstoffe, *Das Papier*, 20, 7, 357-366, 1966.
52. **Jokinen O., Ebeling K.:** Flocculation tendency of papermaking fibers, *Pap. Puu-Pap. Tim.*, 67, 5, 317-325, 1985.
53. **Jung H., Kappen J.:** Odor Control in Papermaking, *Paper Age*, 7-8, 18-21, 2010.
54. **Jung H., Pauly D.:** Introduction to Water Circuit Closure, PTS Seminar Water Circuits in Papermaking, Monachium, 1-2 December, 2010.
55. **Jung W.K., Kutzner H.J.:** Microbiological problems associated with closed process water systems in the paper industry. *European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology* 5, 215-224 (1978).
56. **Kang T.G., Paulapuro H.:** Characterization of Chemical Pulp Fines. *TAPPI J.*, 5, 2, 25-31, 2006.

57. **Kanto Öqvist Ch.**: Microbial life and deposits in paper machine circuits, Academic Dissertation in Microbiology, Faculty of Agriculture and Forestry of the University of Helsinki, 2008.
58. **Kawka W., Ingielewicz H.**: Niektóre problemy budowy i eksploatacji części mokrej maszyny papierniczej, *Przegląd Papierniczy* 426, 7, 244-251, 1979.
59. **Kikiewicz Z.**: Podstawy obliczeń maszyn papierniczych, cz. 2, WPL, 1968, ISBN: 676-05-001-24.
60. **Klarina A., Westermarcka J.**: Corrosion of evaporators in mill closure, *Pap. Puu-Pap. Tim.*, 76, 6-7, 406-408, 1994.
61. **Klepaczka A.**: Konieczność poprawy efektywności energetycznej przemyślu papierniczego, *Przegl. Pap.*, 66, 10, 569-573, 2010.
62. **Kontu K., Ruohonen P., Hippinen I., Ahtila P.**: The effect of choice of utility systems on primary energy consumption – case: press and drying sections of a paper machine, *Chemical Engineering Transactions*, 21, 547-552, 2010.
63. **Kosonen M., Muhonen J., Kinnunen J.**: Retention of fibers, fillers and fiber fines at individual dewatering elements of the gap former, *TAPPI Technology Summit 3-7.03 Atlanta*, 2002.
64. **Kupryszewski G.**: Wstęp do chemii organicznej, PWN Warszawa, 1988, ISBN: 83-7752-2.
65. **Lacorte S., Latorre A., Barcelo D., Rigol A., Malmqvist A., Welander T.**: Organic compounds in paper-mill process waters and effluents, *Trac-Trend. Anal. Chem.*, 22, 10, 725-737, 2003.
66. **Leiviska K. (ed.)**: Papermaking Science and Technology. Vol. 14. Process Control, Series published by TAPPI and the Finnish Paper Engineers' Association, 1999, ISBN: 952-5216-14-4.
67. **Light T., Licht S., Bevilacqua A.C., Morash K.R.**: The Fundamental Conductivity and Resistivity of Water, *Electrochem. Solid-State Lett.*, 8, 1, E16-E19, 2005.
68. **Liimatainen H.**: Interactions between fibers, fines and fillers in papermaking. Influence on deatering and retention of pulp suspensions, Ph. D. thesis, Faculty of Technology of the University of Oulu, *Acta Univ. Oul. C* 334, 2009.
69. **Liley P.E.**: Accurate simple equations for liquid water properties, *Int. J. Mech. Eng. Edu.*, 27, 4, 317-323, 1998.

70. **Lazuchiewicz M.:** Wpływ frakcji drobnej na proces formowania wstęgi papieru, Praca magisterska, Wydział Mechaniczny PŁ, 2005.
71. **Luyben L.W.:** Modelowanie, symulacja i sterowanie procesów przemysłu chemicznego, WNT, Warszawa 1976.
72. **Malherbe S., Cloete T.E.:** Lignocellulose biodegradation: fundamentals and applications: A review. Environ. Sci. Biotechnol. 1: 105-114, 2003.
73. **Maloney T., Todorovic A., Paulapuro H.:** The effect of fiber swelling on press dewatering, Nord. Pulp Paper Res. J., 13, 4, 285-293, 1998.
74. **Mancebo R., Krokoska P.:** The Concept, Properties and Papermaking Role of Fines, Papier a Celuloza 36, 11, V75-V82, 1985.
75. **Mansfield M., Böhmer V.:** The use of computer simulation to find effluent treatment and recirculation solutions for SAPPI pulp and paper mills, Adding Value in a The Global Industry, Int. Convention Center, 8.10 Durban 2002.
76. **Mardon J., Jackson M., Serenius P.:** The Theory and Application of the Wet-end Materials Balance. APPITA J., 25, 45, 21-27, 1972.
77. **Meinander P.O.:** Increase of Paper Machine Efficiency by Using a Compact Wet End System, Wochenbl. Papierfabr., 131, 19, 1137-1145, 2003.
78. **Miller J.:** Wpływ dodatku makulatury oraz sposobu jej przetwarzania na stan mikrobiologiczny papieru przeznaczonego na opakowania produktów spożywczych, Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 1998.
79. **Miranda R., Blanco A., Negro C.:** Accumulation of dissolved and colloidal material in papermaking-Application to simulation, Chem. Eng. J. 148, 385-393, 2009.
80. **Mittal A., Iribarne J., Rajan K.G., Chatterjee S.G.:** Buildup of dissolved solids in a paperboard mill with water closure, Prog. Pap. Recycl. 15, 3, 19-32, 2006.
81. **Möbius C.H.:** Water Use and Wastewater Treatment in Papermills, Herstellung und Verlag, GmbH, Nordertstedt, 2006.
82. **Novak J.:** What is Conductivity and how is it measured? A Technical Handbook For Industry, Hach Company, 2003.
83. **Nöel A., Paris J., Roche A.:** Simulation of white water management strategies for an integrated news-print mill. Pulp Pap. Can., 94, 11, 383-393, 1993.
84. **Olejnik K.:** Komputerowa symulacja pracy partii „mokrej” maszyny papierniczej, Inżynieria i Aparatura Chemiczna 43, 3, 120-123, 2004.

85. **Olejniki K.:** Modelowanie wpływu wybranych czynników fizykochemicznych na retencję w sekcji „mokrej” maszyny papierniczej, *Przem. Chem.*, 85, 8-9, 1293-1291296, 2006.
86. **Olejniki K.:** Modelowanie i symulowanie pracy układu wodno-masowego maszyny papierniczej, *Przeł. Papiern.*, 64, 11, 695-700, 2008a.
87. **Olejniki K.:** Modelowanie zmian przewodności właściwej w układzie wodno-masowym maszyny papierniczej, *Przeł. Papiern.*, 64, 12, 747-752, 2008b.
88. **Orccotoma J.A., Paris J., Perrier M., Roche A.:** Dynamic analysis of fibrous material and dissolved solids distribution in the wet-end of a newsprint mill, *APPITA J.*, 52, 2, 105-113, 1999.
89. **Paris J.:** A systems approach to system closure in integrated newsprint mills, *Pulp Pap. Can.*, 101, 5, 34-42, 2000.
90. **Paulapuro H. (ed.):** Papermaking Science and Technology, Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End, Second Edition, Finnish Paper Engineers' Association, 482-492, 2008, ISBN: 952-5216-08-X.
91. **Petera J.:** Symulacja numeryczna w przemyśle i ochronie środowiska, XVII Ogólnopolska Konferencja Inżynierii Chemicznej i Procesowej, Polanica Zdrój, 17-21 września 2001.
92. **Platikanov D., Exerowa D. (ed.):** Highlights in Colloid Science, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009.
93. **Pohjalainen K.:** Successful reduction in fresh water consumption with OptiFilter membrane, *Fiber&Paper*, 7, 3, 20-21, 2005.
94. **Pokhrel D., Viraraghavan T.:** Treatment of pulp and paper mill wastewater – a review, *Science of Total Environment*, 333, 37-58, 2004.
95. **Pontremoli A.:** Modeling and Control of a Paper Drying Section Using Modelica, Master Thesis, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden, 2000.
96. **Pranovich A.V., Reunanen M., Sjöholm R., Holmbom B.:** Dissolved Lignin and Other Aromatic Substances in Thermomechanical Pulp Waters, *J. Wood Chem. Technol.*, 25, 109-132, 2005.
97. **Pruszyński P.,** ATCP Wet End Chemistry Course, Concepcion, October 11, Chile, 2006.
98. **Przybysz K., Szwarcsztajn E.:** O frakcji drobnej masy celulozowej, *Przeł. Papiern.*, 28, 8, 275-278, 1972.

99. **Przybysz K., Szwarcsztajn E.**: Wpływ frakcji drobnej na smarność masy papierniczej, *Przegl. Papiern.*, 29, 4, 105-109, 1973.
100. **Przybysz, K.**: Badania nad mechanizmem procesu mielenia mas celulozowych, Praca doktorska, Politechnika Łódzka 1971.
101. **Przybysz K.**: Mechanizm oraz przebieg powstawania kryllu w procesie mielenia mas celulozowych, *Przegl. Papiern.*, 32, 2, 11-15, 1976.
102. **Przybysz K.**: Graniczna i teoretyczna suchość prasowanej wstęgi papierniczej. *Przegl. Papiern.*, 458, 3, 84-87, 1982.
103. **Przybysz K.**: Równowaga technologiczna układu wodno-masowego papierni. *Przegl. Papiern.*, 613, 8, 385-389, 1995.
104. **Przybysz K., Czechowski J., Wysocka-Robak A.**: Wpływ zamykania układu wodno-masowego MP na efektywność działania środków chemicznych, Sympozjum SPP „Środki chemiczne w papiernictwie”, Łódź, 29-30.11, 1994.
105. **Przybysz K., Wysocka-Robak, A., Olejnik K.**: Konsekwencje zamykania obiegu wodnych w procesie wytwarzania papieru, Konferencja Naukowo-Techniczna INPAP 98 – Duszniki Zdrój, 30.09-2.10, 1998.
106. **Ravnjak, D., Ilic, G., and Moze, A.**: Designing Water Reuse in a Paper Mill by Means of Computer Modelling. *Chem. Biochem. Eng. Q.* 18, 1, 13-19, 2004.
107. **Retulainen E., Moss P., Nieminen K.**: Effect of Fines on the Properties of Fiber Networks, in Vol. 1 Transactions of the Fundamental Research Symposium held at Oxford: September 1993 Edited C.F. Baker, publishers PIRA International, Leatherhead Surrey, UK.
108. **Sandgren B., Wahren D.**: Studies on pulp crill, Part 2. A Crill Screen, *Svensk Papperstidn.* 63, 23, 854, 1960.
109. **Sandgren B., Wahren D.**: Studies on pulp crill. Part 3. Influence on some properties of pulp and paper, *Svensk Papperstidn.* 63, 24, 879, 1960.
110. **Scallan A., Laivins G.V.**: The Mechanism of Hornification of Wood Pulps, in Vol. 2 Transactions of the Fundamental Research Symposium held at Oxford: September 1993 Edited C.F. Baker, publishers PIRA International, Leatherhead Surrey, UK.
111. **Schmitz D.T.**: Combined Heat and Power (CHP) as a Special High Efficiency Case, DSM AUPTDE workshop, Tripoli, Libya, 10 February 2009.
112. **Selecki A., Gradoń L.**: Podstawowe procesy przemysłu chemicznego, WNT, Warszawa, 1985, ISBN: 83-204-0650-1.

113. **Serra O.:** Fundamentals of Well-Log Interpretation, Elsevier Science Publishers, 1988, ISBN: 0-444-42132-7.
114. **Stana-Kleinschek K., Ribitsch V.:** Electrokinetic properties of processed cellulose fibers. Colloid Surf A-Physicochem. Eng. Asp., 140, 1-3, 127-138, 1998.
115. **Steen M.:** Turbulence and Flocculation in Fibre Suspensions, Ph.D. thesis, University of Trondheim, 1990.
116. **Steenberg B., Sandgren B., Wahren D.:** Studies on pulp crill. Part 1. Suspended fibrils in paper pulp fines. Svensk Papperstidn. 63, 12, 395, 1960.
117. **Szwarczajtajn E. (ed.):** Konsolidacja i wykończenie wstęgi papieru, WNT, Warszawa 1983.
118. **Szwarczajtajn E., Przybysz K. :** Investigations on changes in properties of recycled pulps fractions, Cell. Chem. Technol., 9, 6, 597-601, 1976.
119. **Szwarczajtajn E., Przybysz K.:** The Role of Pulp Fractions and Processing Variables in Recycling, Vol. 2 Fiber-Water Interactions in Paper-Making Trans. Symposium held at Oxford: September 1977, FRS, Tech. Div. The British Paper and Board Ind. Fed. Plough Pl., Fetter Lane London EC4A 1AL, 1977.
120. **Tenno R., Paulapuro H.:** Removal of dissolved organic compounds from paper machine whitewater by membrane bioreactors: a comparative analysis, Control Eng. Practice, 7, 1085-1099, 1999.
121. **Theodore L., Ricci F., Van Vilet T.:** Thermodynamics for Practicing Engineer, Wiley & Sons, 2009, ISBN: 978-0-470-44468-9.
122. **Thirumalini S., Kurian J.:** Correlation of Electric Conductivity (EC) and Total Dissolved Solids (TDS) in Industrial Waste Water, Curie Journal, 1, 1, 72-79, 2009a.
123. **Thirumalini S., Kurian J.:** Correlation between Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids in Natural Waters, Malays. J. Sci., 28, 1, 55-61, 2009b.
124. **Thorn I., Che On Au (eds.):** Applications of Wet End Chemistry, 2nd Edition, Springer Science+Business Media B.V., 2009, ISBN 978-1-4020-6037-3.
125. **Volkov V.A., Juriev V.I.:** Effect of humic substances on paper sizing, Bumażnaja Promyszlennost, 3, 9-11, 1974a.
126. **Volkov V.A., Juriev V.I.:** Effect of humic substances on the brightness of sized paper, Bumażnaja Promyszlennost, 5, 6-7, 1974b.

127. **Walton N.R.G.:** Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids – What is Their Precise Relationship? *Desalination*, 72, 3, 275-292, 1989.
128. **Wang H., Wang P.A., Duncan S.:** Advanced process control in paper and board making, Pira Technology Series, 1997 ISBN: 10-18-580-2100-6.
129. **Waterhouse J.F., Omori K.:** The Effect of Recycling on the Fines Contribution to Selected Paper Properties, in Vol. 2 Transactions of the Fundamental Research Symposium held at Oxford: September 1993, Edited C.F. Baker, publishers PIRA International, Leatherhead Surrey, UK.
130. **Wearing J.T., Barbe M.C., Ouchi M.D.:** The Effect of White Water Contamination on Newsprint Properties, *J. Pulp Pap. Sci.*, 11, 4, J113-J117, 1985.
131. **Wiggins A.:** Practical Water Management in Paper and Board Mills. Book produced by the Environmental Technology Best Practice Programme, Copyright Crown, UK 1998.
132. **Wook-Yeon Ch., Seo Yung-Bum S.:** Impact of Fines Properties on Fiber Furnish Quality, *Journal of Korea Technical Association of The Pulp and Paper Industry*, 37, 2, 1, 2005.
133. **Xu Y., Deng Y.:** The buildup of dissolved solids in closed white water systems. *TAPPI J.*, 3, 8, 17-21, 2004.
134. **Yap F.E., Kwok K.E., Dumont A.G.:** Dynamic Simulation and Control of a Paper Machine Wet End. *The Can. J. Chem. Eng.*, 79, 4, 296-303, 2001.
135. **Yeong-Koo Y., Sung Chul Y., Jae Yong R., Hong K.:** Modeling and Simulation of Wet-end White Water System in the Paper Mill. *Korean J. Chem. Eng.*, 21, 2, 358-364, 2004.
136. **Yli-Fossi T., Kosonen M., Toivonen M., Karaila I., Lautala P., Huhtelin T.:** Modelling of Stock Fractions for a Dynamic Paper Machine Simulator. *Scandinavian Paper Symposium*, Helsinki, Finland 10-11 September, 174-179, 2002.
137. **Yli-Fossi T., Kosonen M., Lautala P.:** Modelling of Retention for a Dynamic Paper Machine Simulator. *IASTED International Conference, Applied Simulation and Modelling*, Rhodes, Greece, 28-30 June, 392-397, 2004.
138. **Zhang X., Beatson R.P., Cai Y.J., Saddler J.N.:** Accumulation of Specific Dissolved and Colloidal Substances During White Water Recycling Affects Paper Properties, *J. Pulp Pap. Sci.*, 25, 6, 206-210, 1999.
139. **Zhou Y.M., Li J.G., Tao J.S., Yin Y.J., Liu H.B.:** Design of modelling and online simulation for energy systems in papermaking mill, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10) Granada (Spain)*, 23rd to 25th March, 2010.

SUMMARY

Every properly functioning, stable continuous technological process operates under certain dynamically balanced conditions. In general, this state can be described as a “Technological Equilibrium” of a process. To be useful, technological equilibrium of any process should be precisely determined by physical, physico-chemical and technological parameters. In case of paper production process, technological equilibrium is a set of the following partial equilibriums: water, mass, physico-chemical, microbiological and thermal. These equilibriums can be characterized by the following factors: specific water consumption, consistency of suspended and dissolved (organic and inorganic) solids in a technological water, amount and species of microorganisms in a technological water and temperature of a technological water.

In the past, when high quality raw materials were used and fresh water consumption did not restrict the process, technological system of a paper mill had relatively simple, open and linear structure. As a result, technological equilibrium in such a system had a minor impact on the process and did not limit it.

Modern paper industry is strongly influenced by economic, environmental and social factors. For example, there is a pressure for higher utilization of recycled materials and reduction of both fresh water consumption and waste water effluent. Unfortunately, a characteristic feature of paper production is its internal, high demand for water, which cannot be easily reduced in practice. Therefore, lower specific water consumption can be achieved only by replacing the fresh water with circulating post production (technological) waters.

One must remember that a lot of very complex phenomena occur in modern papermaking process, thus this process can be compared with multi-stage reactor where certain streams of reagents from different stages of a process are recirculated. In papermaking, recirculated streams carry a load of suspended and dissolved solids and secondarily affect the process. As a result, this process can be considered as a unsteady with a dead-time presence. In addition, papermaking process is a MIMO system (Multiple Input Multiple Output) which means that it depends on several parameters simultaneously. A lot of these parameters are also coupled.

All above factors cause, that the most sophisticated solutions must be used in order to control this process including hierarchical distributed control systems, multivariable model predictive control systems, fuzzy logic, neural networks etc. However, it still does not guarantee absolutely stable operations.

Nowadays, decrease of the specific fresh water consumption is one of the most difficult tasks in papermaking. Increased usage of circulating technological waters leads to significant change of the technological equilibrium in paper mill. In extreme situation, it can result in unstable process parameters, lower production efficiency and quality. Therefore, investigations related to technological equilibrium in paper production nowadays are fundamental from practical point

of view. Unfortunately, results obtained during industrial measurements are often not reliable. Complexity of the process, short dwell times and constant parameter corrections by control systems are the main reasons. That is why further development and optimization in this industry depend on accuracy of mathematical models and computer software which provide the possibility of process simulations and analysis without without a necessity to interfere with a real system.

As a result of above factors, presented work was undertaken. The main objective of this work was to develop the model and computer application for investigation and analysis of the technological equilibrium in water-mass loops of a paper machine system, especially including: water equilibrium, mass equilibrium and physico-chemical equilibrium. The main task of the research was preceded by laboratory experiments related to kinetics of fines fraction development in technological waters of a paper mill and desorption of dissolved solids from papermaking pulps. Temperature, consistency and pulp type were the main variables. Relationships between specific fresh water consumption and accumulation of suspended and dissolved solids in technological waters were also determined. As a result of the analysis, an empirical formula was generated that – for the assumed specific fresh water consumption – enables to determine the value of a given partial equilibrium.

Obtained results were subsequently used during development of the mathematical model and process simulator of a wet-end part of a paper machine. DCS-like interface was also implemented into the application. Main control loops similar to real control systems of a paper machine (including PID local controllers) were implemented as well. Mathematical description of the model in the application takes about 1500 lines of code. Full program code takes about 20.000 lines. Steady-state verification of the developed model and the application showed that it works with satisfactory accuracy, thus it made possible to determine quantitatively the state of technological equilibrium with high precision.

Based on the results obtained from simulations it was found that decrease of the specific fresh water consumption caused exponential growth of the consistency of both suspended and dissolved solids and extended the time of stabilization of technological equilibrium in the investigated process. For example, decrease of specific fresh water consumption from 220 m³/t to 5 m³/t doubled the consistency of suspended solids in technological waters and extended stabilization time of the technological equilibrium from 2,5 minutes to 130 minutes. I was also found that the time of mass equilibrium stabilization was the shortest. On the other hand, the time of stabilization of a physico-chemical equilibrium related to organic compounds was the longest. Proposed software enabled also the possibility of analysis of unstable, transient states which originated from a system response to applied changes.

Presented results and developed application are the complement to the knowledge of the functioning of a technological system of a paper machine.

ZAŁĄCZNIK I – SKRÓCONY OPIS PROGRAMU WETEND SIMULATOR

Program „WetEnd Simulator” został zaprojektowany i napisany w taki sposób, aby jego interfejs oraz obsługa były jak najbardziej zbliżone do rzeczywistego systemu kontroli i sterowania procesem wytwarzania papieru w maszynie papierniczej, co pozwoliłoby wykorzystywać to narzędzie przez szersze grono osób zainteresowanych tą tematyką.

Do uruchomienia i poprawnego działania programu WetEnd Simulator wymagane są:

- Komputer osobisty klasy PC pracujący pod kontrolą systemu operacyjnego MS Windows XP, MS Vista lub MS Windows 7,
- Karta graficzna pozwalająca na pracę w rozdzielczości 1024x768 i 32-bitowym kolorze.

Po uruchomieniu programu i potwierdzeniu ekranu tytułowego pokazuje się okno główne (rys. Z1), które jest podzielone na pięć podstawowych obszarów roboczych. Górna część okna zawiera menu główne. Poniżej znajduje się obszar informacji o bieżącej symulacji, w którym, poczynając od lewej strony, znajdziemy:

- aktualne parametry produkowanego asortymentu (gramatura, suchość, wskaźniki wytrzymałościowe),
- dane ogólne – ilość wyprodukowanego papieru, ilość zużytej wody świeżej, ilość braku własnego oraz wskaźniki wydajności i jednostkowego zużycia wody świeżej (w m³ na tonę produkcji),
- ustawienia zadane – gramatura i prędkość maszyny.

Pod tym obszarem znajduje się okno główne, w którym pokazano schemat technologiczny symulowanego układu. Główne strumienie wyposażone są w liczniki natężenia przepływu odpowiedniego medium i jego stężenia (ewentualnie innego, charakterystycznego i istotnego parametru). Niektóre elementy (np. zawory) mogą być sterowane ręcznie lub automatycznie. Obok symbolu urządzenia, które włączono w komputerowy system sterowania procesem (DCS – Distributed Control System) widnieje obramowane na żółto okienko z aktualnym statusem regulacji. Zgodnie z zasadą działania systemu DCS możliwe są trzy ustawienia regulacyjne symbolizowane za pomocą odpowiedniego skrótu i koloru:

- MANL – tryb manualny (kolor zielony) oznaczający brak sterowania automatycznego,
- AUTO – tryb automatyczny (kolor czerwony) oznaczający pracę regulatora lokalnego lub nadrzędnej pętli regulacyjnej,
- CASC – tryb kaskadowy (kolor żółty) oznaczający pracę regulatora podrzędneho w trybie kaskadowym.

Większość elementów aktywnych (poza oknami oznaczenia stanu automatyki) zostaje wyróżniona, jeżeli znajdzie się nad nimi kursor myszy. W przypadku zaworów, podwójne kliknięcie w takim obszarze powoduje wyświetlenie okienka dialogowego umożliwiającego zmianę danej wartości.

Ponadto dla aktywnych zaworów zastosowano następujące oznaczenia:

- kolor zielony – zawór otwarty,
- kolor czerwony – zawór zamknięty.

Niezależnie od rodzaju przeprowadzanej symulacji, jakość papieru jest zawsze nadrzędnym celem dla programu kontrolującego proces. Z tego też powodu poniżej okna głównego znajduje się obszar alarmów systemowych sygnalizujących nieprawidłowości w procesie. Podobnie jak w rzeczywistych systemach, alarmy są oznaczane kolorami w zależności od ich priorytetu:

- fioletowy kolor tła oznacza alarm informacyjny,
- czerwony kolor tła oznacza alarm krytyczny dla procesu.

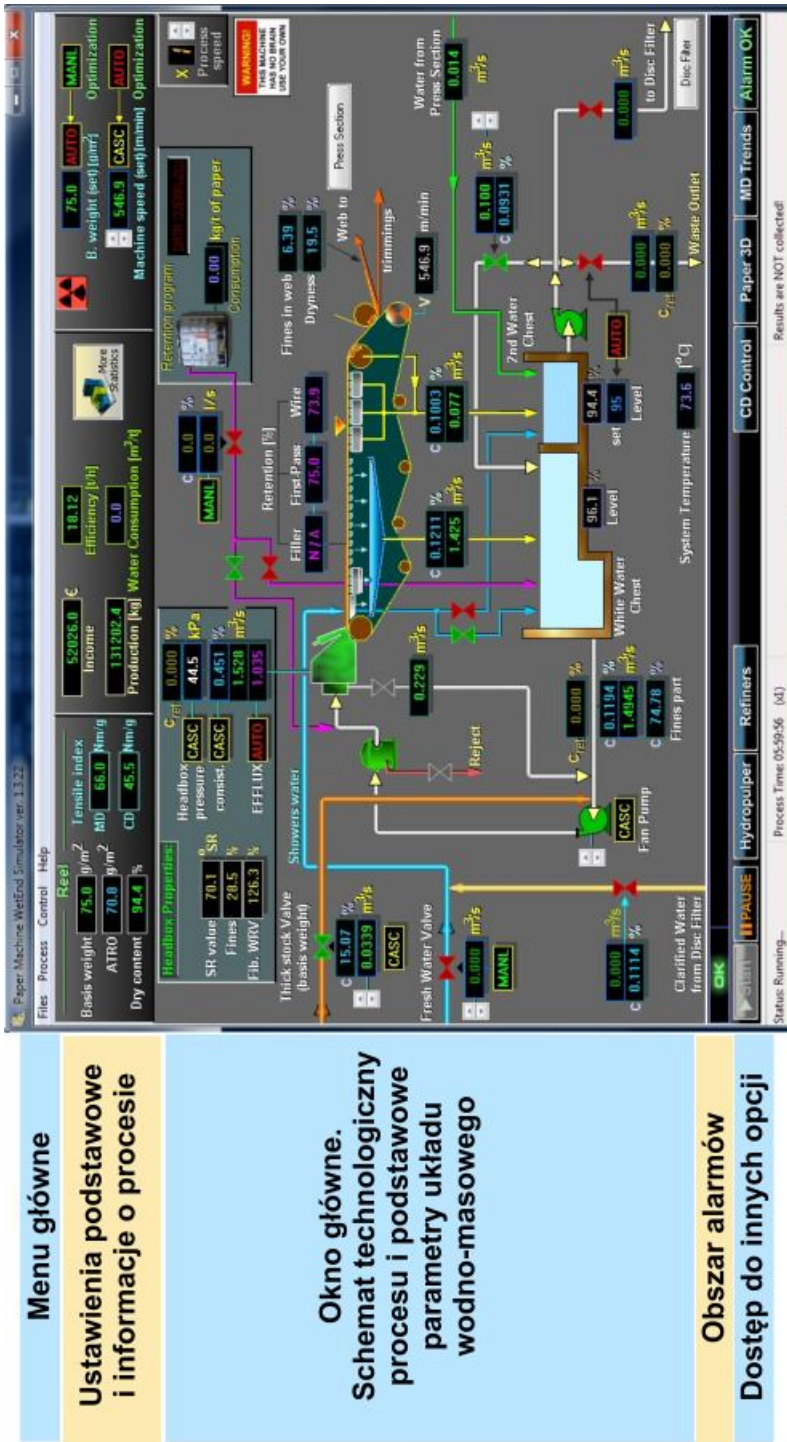
Pod polem alarmów umieszczono przyciski pozwalające uruchomić lub zatrzymać symulację, przenieść się do innych sekcji układu technologicznego lub obejrzeć generowane dane w postaci wykresów trendów. Obecnie dostępnych jest siedem przycisków oznaczonych odpowiednio:

- Start,
- Pauza/Stop,
- Hydropulper (układ przygotowania półproduktów włóknistych),
- Refiners (dostęp do układu mielenia),
- CD Control (ustawienia szczeliny wypływowej wlewu),
- Paper 3D (trójwymiarowa symulacja profilu poprzecznego wytwarzanego papieru),
- MD Trends (wykresy zmian parametrów procesu),
- Alarm OK (potwierdzenie odbioru alarmu).

Przycisk *Start* pozwala na uruchomienie algorytmów obliczeniowych. Powinien zostać wciśnięty po wprowadzeniu wszystkich danych początkowych w celu rozpoczęcia symulacji.

Przycisk *Pauza/Stop* pozwala na zatrzymanie bieżącej symulacji oraz po powtórny przyciśnięciu – jej zakończenie. Następuje wówczas wyzerowanie wszystkich komórek danych biorących udział w obliczeniach.

Przycisk *Alarm OK* pozwala na potwierdzenie wyświetlanego alarmu. Zgodnie z zasadami działania rzeczywistych układów komputerowych, widniejący na ekranie alarm powinien (po potwierdzeniu) zniknąć, gdy jego przyczyna zostanie usunięta. Jeżeli przyczyna alarmu wciąż istnieje, alarm pozostanie na ekranie.

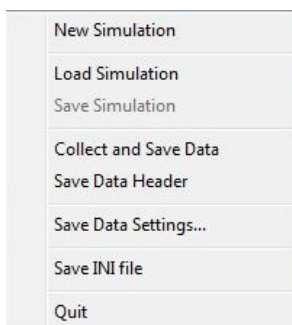


Rys. Z1. Widok i opis poszczególnych sekcji głównego okna programu

Menu główne

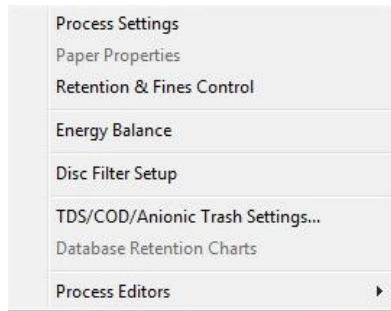
Menu główne zawiera cztery rozwijalne pozycje, z których najistotniejsze są dwie pierwsze. Podmenu „Files” (rys. Z2) zawiera opcje pozwalające na:

- Uruchomienie nowej symulacji („New Simulation”),
- Załadowanie zapisanej wcześniej symulacji („Load Simulation”),
- Zapisanie aktualnie trwającej symulacji („Save Simulation”),
- Włączenie zbierania wszystkich danych generowanych przez symulator („Collect and Save Data”),
- Opcjonalne włączenie/wyłączenie zapisu nagłówka w pliku z danymi zawierającego bieżące ustawienia symulacji („Save Data Header”),
- Zapisanie pliku INI zawierającego dane domyślne dla przygotowywanej symulacji, co jest wygodne w przypadku wykonywania wielu symulacji o tych samych założeniach początkowych („Save INI file”),
- Opuszczenie i zamknięcie programu („Quit”).



Rys. Z2. Podmenu „Files”

Podmenu „Process” (rys. Z3) umożliwia dostęp do zaawansowanych ustawień symulacji. W opcji „Process settings” można m.in. zmienić objętość głównych obiektów układu technologicznego i ustawić opóźnienia w procesie, opcja „Retention & Fines Control” dotyczy ustawień procesu formowania i rozdziału strumieni wody i masy papierniczej na sicie formera, opcja „Energy Balance” umożliwia wprowadzenie danych energetycznych dla poszczególnych strumieni wejściowych do procesu, zaś opcja „TDS/COD/Anionic Trash Settings...” dotyczy początkowych wartości parametrów fizykochemicznych strumieni wejściowych.



Rys. Z3. Podmenu „Process”

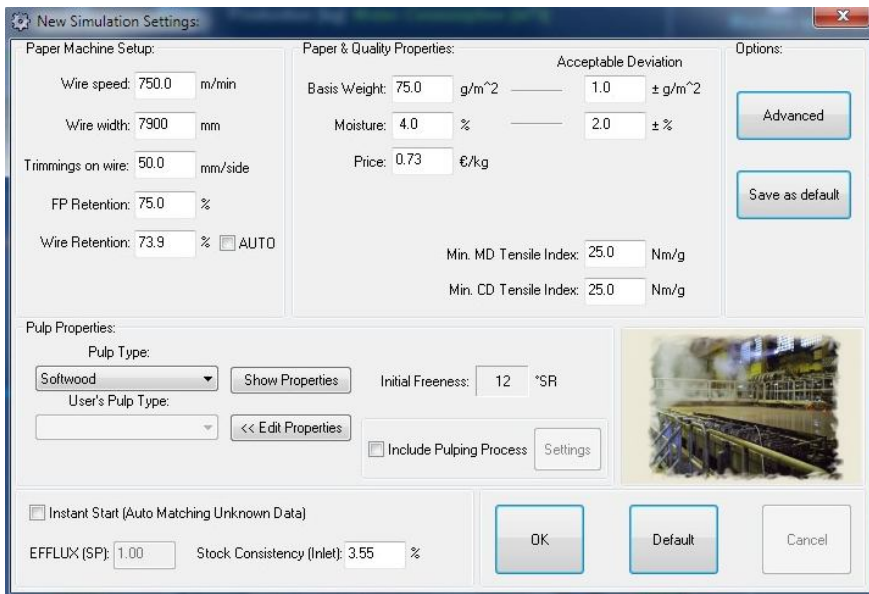
Dla wskaźników, dla których nie znaleziono generalnych zależności sporządzono specjalne moduły edycyjne pozwalające na wykorzystywanie danych doświadczalnych. Mając np. dane przebiegu zmian określonych właściwości masy papierniczej czy wody obiegowej, można wykonać analizę, podczas której program będzie interpolował dane tabelaryczne, symulując w ten sposób zmiany w procesie. Moduły edycyjne znajdują się w opcji „Process Editors”.

Wykonanie symulacji

Ze względu na znaczne rozbudowanie programu, opis jego obsługi zostanie ograniczony do niezbędnych informacji pozwalających na pracę i wykonywanie symulacji. Zakłada się, że osoba zainteresowana użytkowaniem tego narzędzia musi posiadać podstawową wiedzę z zakresu pracy maszyny papierniczej, znać ogólny układ technologiczny oraz możliwe zakresy wielkości poszczególnych parametrów.

Generalnie każda symulacja musi być rozpoczęta od wybrania z menu „Files” opcji „New Simulation”. Powoduje to otwarcie okna dialogowego (rys. Z4) i podanie początkowych parametrów procesu. Należą do nich:

- prędkość sita w maszynie papierniczej,
- szerokość sita,
- wielkość obcinka wstęgi na sicie,
- początkowa wielkość retencji i jej dopuszczalna odchyłka,
- założona gramatura i jej dopuszczalna odchyłka,
- założona wilgotność końcowa wstęgi,
- ew. cena produktu (do analizy zysków i strat),
- minimalna dopuszczalne właściwości wytrzymałościowe papieru w kierunku MD i CD,
- rodzaj masy papierniczej.



Rys. Z4. Okno dialogowe wprowadzania nowych danych dla symulacji

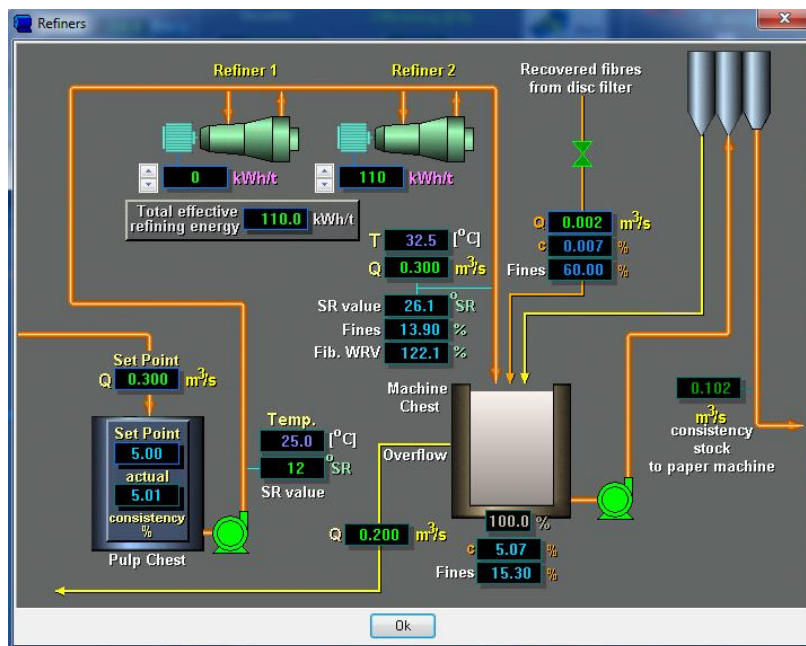
Po poprawnym wprowadzeniu wszystkich danych należy wcisnąć przycisk „OK”. W tym momencie program jest gotowy do rozpoczęcia obliczeń zgodnie z wprowadzonymi wartościami. Wciśnięcie nie jest jednak jednoznaczne z uruchomieniem procesu symulacyjnego! Właściwe uruchomienie nastąpi po przyciśnięciu klawisza „Start” znajdującego się w dolnej części okna głównego (patrz rys. Z1). Po wykonaniu tej czynności, można zaobserwować wzrost prędkości sita, pojawiają się pierwsze alarmy procesu. Praca programu ma być zbliżona do pracy rzeczywistego układu technologicznego, a więc w momencie rozpoczęcia nowej symulacji należy zalać wodą świeżą przynajmniej I obieg wodny poprzez otwarcie zaworu „Fresh Water Valve”.

W trakcie oczekiwania na zakończenie procesu zalewania układu można (w oknie „Refiners” – rys. Z5) ustalić stężenie i natężenie przepływu masy gęstej do sekcji mielenia (skąd będzie ona podawana poprzez kadkę stałego poziomu do maszyny papierniczej). Tutaj ustala się również parametry procesu mielenia, które są uzależnione od wymagań stawianych produktowi końcowemu.

Po wypełnieniu kadzi I wody podsitowej wodą świeżą można włączyć pompę wlewu („Fan Pump”) wprowadzając (wcześniej wyliczone) natężenie przepływu, które musi korespondować z zakładanym współczynnikiem wyprzedzenia sita EFLUX. Kiedy układ się ustabilizuje, można otworzyć zawór gramatury (przepływu masy gęstej). W tym momencie symulator zaczyna realizować wszystkie algorytmy obliczeniowe i wyświetlać wyniki tych obliczeń

w odpowiednich okienkach. Zmiany poszczególnych wskaźników można śledzić wciskając opcję „MD Trends” i wybierając dany parametr do wyświetlania.

Program umożliwia maksymalnie czterdziestokrotne przyspieszenie czasu symulacji względem czasu rzeczywistego.



Rys. Z5. Okno dialogowe układu przygotowania masy papierniczej (mielenie i dozowanie)

Zapisywanie symulacji oraz wygenerowanych danych

Ze względu na stopień skomplikowania programu, zaistniała konieczność umożliwienia zapisu prowadzonych symulacji, tak aby można było je ponownie i natychmiastowo odtworzyć bez konieczności zaczynania pracy od początku. Pozwala na to opcja „Files” → „Save Simulation”. Zapisywane są ustawienia początkowe, stan automatyki zaworów i aktualne wartości wszystkich liczników z wyłączeniem trendów, a utworzone w ten sposób pliki mają rozszerzenie *.sim. Odtworzenie zapisanej symulacji odbywa się poprzez wybranie opcji „Files” → „Load Simulation”.

Zapisanie stanu symulatora jest możliwe w każdym, dowolnym momencie trwania symulacji.

Jednym z podstawowych – poza zapisem bieżącej symulacji – zadań opisywanego programu jest generowanie wyników w taki sposób, aby po zakończeniu symulacji można było łatwo dokonać ich analizy przy pomocy innych, zewnętrznych programów. Jednym z takich narzędzi jest program Origin firmy

Microcal. Dane zapisywane są w takiej formie, aby można je było łatwo przenieść do tego środowiska, przy czym zastosowany format pozwala także na eksport wyników do programu Microsoft Excel.

Sam zapis odbywa się poprzez zaznaczenie w menu głównym opcji „Files” → „Collect and Save Data”. W tym momencie, co 1 sekundę w pliku z rozszerzeniem *.dat zapisują się wszystkie dane, zaznaczone (włączone) w „Files” → „Save Data Settings...”. Należy pamiętać, że dane (wyniki pracy symulatora) zapisywane są TYLKO w trakcie trwania symulacji.

Najnowsza, pełna wersja programu jest dostępna pod adresem:
<http://www.paperproduction.net>

