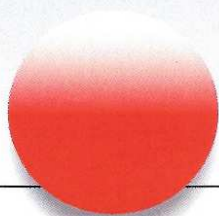




STOWARZYSZENIE POLSKICH CHEMIKÓW KOLORYSTÓW



INFORMATOR CHEMIKA KOLORYSTY





Stowarzyszenie Polskich Chemików Kolorystów
i Fundacja Rozwoju Polskiej Kolorystyki
uprzejmie informują, że



XXXIX SEMINARIUM POLSKICH KOLORYSTÓW

**„Inteligentne technologie wykończalnicze:
efektywność, ekologia, innowacja”**

odbędzie się w dniach 23-25 września 2026 r.
w Ośrodku Wypoczynkowym „**Orle Gniazdo Hucisko**”
ul. Orle Gniazdo 20, 42-421 Hucisko.

Uprzejmie prosimy
o uwzględnienie terminu Seminarium w Państwa planach.
Zapraszamy wszystkich zainteresowanych do kontaktu z nami w zakresie:
uczestnictwa, wygłoszenia referatów i zorganizowania sesji panelowych

[e-mail: kolorysty@kolorysty.org.pl](mailto:kolorysty@kolorysty.org.pl)

Organizatorzy



STOWARZYSZENIE POLSKICH
CHEMIKÓW KOLORYSTÓW

FUNDACJA ROZWOJU
POLSKIEJ KOLORYSTYKI

Afiliowane przy International Federation
of Associations of Textile Chemists and Colourists

INFORMATOR CHEMIKA KOLORYSTY

Rok 2026

nr 47

ZESPÓŁ REDAKCYJNY:

dr inż. Bogumił Gajdzicki
dr inż. Anetta Walawska
dr inż. Stanisław Pruś
mgr inż. Jolanta Janicka
mgr inż. Izabela Oleksiewicz

REDAKCJA:

STOWARZYSZENIE POLSKICH
CHEMIKÓW KOLORYSTÓW
90-007 Łódź, Pl. Komuny Paryskiej 5a
tel. 42 632-89-67
fax 42 632-50-03
www.kolorysci.org.pl
e-mail: kolorysci@kolorysci.org.pl

KOMITET NAUKOWY:

dr hab. inż. Lucyna Bilińska, prof. PŁ
prof. dr hab. inż. Wojciech Czajkowski
dr inż. Bogumił Gajdzicki
dr inż. Anetta Walawska
dr inż. Stanisław Pruś

WYDAWCA

FUNDACJA ROZWOJU
POLSKIEJ KOLORYSTYKI
90-007 Łódź, Pl. Komuny Paryskiej 5a
tel. 42 632-89-67
fax 42 632-50-03
www.kolorysci.org.pl
e-mail: kolorysci@kolorysci.org.pl
nakład: 110 egzemplarzy

Przygotowanie edycji bieżącego numeru
Informatora Chemika Kolorysty:
dr inż. Stanisław Pruś

SPIS TREŚCI:

	3
1. Barwienie merceryzowanej przędzy bawełnianej barwnikami reaktywnymi <i>Bogumił Gajdzicki</i>	5
2. Nowoczesne podejścia do bielenia materiałów celulozowych – w kierunku technologii przyjaznych środowisku <i>Magdalena Bilińska, Lucyna Bilińska</i>	25
3. Charakterystyka przemysłu włókienniczego i jego wpływu na stan środowiska oraz zasoby wodne <i>Anetta Walawska, Magdalena Olak-Kucharczyk, Joanna Olczyk, Iwona Kucińska – Król, Martyna Gloc, Renata Żyła</i>	33
4. Odzysk wody w przemyśle włókienniczym - dobór optymalnej technologii oczyszczania ścieków włókienniczych <i>Magdalena Olak-Kucharczyk, Martyna Gloc, Iwona Kucińska – Król, Joanna Olczyk, Anetta Walawska, Renata Żyła</i>	46
5. Zastosowanie oczyszczonych ścieków włókienniczych jako medium procesowego w barwieniu wyrobów włókienniczych <i>Iwona Kucińska-Król, Joanna Olczyk, Magdalena Olak-Kucharczyk, Anetta Walawska, Martyna Gloc</i>	51
6. Teoria barwienia – teoria, która wciąż powstaje, ale bardzo wolno. Cz. IV. „Transport barwnika z kąpeli do powierzchni włókna – znaczenie przepływu i warstwy granicznej” <i>Zenon Grabarczyk</i>	59
7. Rondo w Zgierzu im. Oskara Gerlicza - chemika kolorysty i Burmistrza Miasta w 1918 roku <i>Stanisław Pruś, Marianna Romanowicz</i>	64
8. Bal Karnawałowy 2026 r. <i>Jerzy Piestrzeniewicz</i>	66
Informacje:	
1. XXXIX Seminarium Polskich Kolorystów	2
2. Fundacja Rozwoju Polskiej Kolorystyki – materiały do badań	4

DRUK:

PIKTOR POLIGRAFIA Sp. z o.o.
93-231 Łódź, ul. Gen. Jarosława Dąbrowskiego 247/249

Fundacja Rozwoju Polskiej Kolorystyki

Dążąc do ujednolicenia zasad i metod oceny wytwarzanych w kraju barwnych wyrobów włókienniczych prowadzimy działania w zakresie ciągłej sprzedaży następujących artykułów do badań i oceny odporności wybarwień zgodnych z wprowadzonymi w Polsce normami europejskimi EN i ISO 105.

Lista oferowanych aktualnie artykułów jest następująca:

Szara skala do oceny zmian barwy PN EN ISO 105 A02
Szara skala do oceny stopnia zabrudzenia bieli, PN EN ISO 105 A03
ECE detergenty w opakowaniach po 2 kg, PN EN ISO 105 C06 (typ 3) B
Tkanina towarzysząca wiskozowa (w metrach), PN EN ISO 105 F02
Tkanina towarzysząca poliamidowa (w metrach), PN EN ISO 105 F03
Tkanina towarzysząca poliestrowa (w metrach), PN EN ISO 105 F04
Tkanina towarzysząca akrylonitrylowa (w metrach), PN EN ISO 105 F05 (akrylowa)
Tkanina towarzysząca wieloskładnikowa (pocięta w paczkach), PN EN ISO 105 F10
Tkanina towarzysząca bawełniana (pocięta w paczkach), PN EN ISO 105 F02
Tkanina towarzysząca wełniana (pocięta w paczkach), PN EN ISO 105 F01
Tkanina towarzysząca bawełniana do badania odporności wybarwień na tarcie (pocięta w paczkach), PN EN ISO 105 F09
Błękitna skala do badania odporności barwy na światło, PN EN ISO 105 B01 do B06
Tkanina towarzysząca wełniana (m) PN EN ISO 105 F01
Tkanina towarzysząca bawełniana (m) na odporności mokre PN EN ISO 105 F02
Tkanina towarzysząca bawełniana (m) na tarcie PN EN ISO 105 F09



Certificate of Conformity	
SDC ECE Non-Phosphate Detergent A	
Product Code: 2408, 2420	
Unit Size	2kg Tub, 15kg Box
Batch:	B16
Year of Manufacture:	2009
Statement of Conformity	
This is to certify that the SDC ECE Non-Phosphate Detergent A has been produced and independently tested to conform to the specifications of ISO 105 C08:2001 and ISO 6330:2000	
Independent Testing	
Where applicable, to ensure that all results are accurate, unbiased and impartial, testing is carried out in Independent UKAS Accredited Test Laboratories and sampling is conducted using ISO guidelines as a minimum requirement.	
Internal Master Standards	
Conformity of SDC ECE Non-Phosphate Detergent A over time, between and within batches, is vital to give consistent test results and enable accurate comparison of test specimens to performance requirements. SDC ECE Non-Phosphate Detergent A is compared during every test to a Historic Internal Master Standard, which guarantees no drift in performance over time.	
Packaging	
Please ensure that the product is retained in its original SDC packaging, which contains the correct batch details. All product packaging is tested to ensure there are no contaminants that could cause product degradation to occur. Pack sizes are measured and approved using UK weights and measures act.	
Signed:	
M Yare - Managing Director	

SDC Enterprises Limited, Unit 29 Pilcliffe Way, Bradford BD5 7SD. Registration number 4309066. Registered in England

SDC Certificate Reference: 0784

Artykuły te są do nabycia w siedzibie Fundacji Rozwoju Polskiej Kolorystyki Pl. Komuny Paryskiej 5a, pok. 403 tel.: 42 - 632 89 67 w każdy piątek w godzinach 12.00 – 15.00.

Informacji dotyczących składania zamówień i sposobu zakupu udziela w podanych terminach, udziela mgr inż. Jolanta Janicka. W pozostałe dni tygodnia prosimy o kontakt mailowy:

jolianicka@interia.pl
kolorysty@kolorysty.org.pl

Na życzenie odbiorców, dla oferowanych produktów dostarczamy certyfikat zgodności, którego przykładowy wzór prezentujemy obok.

Zainteresowane osoby i instytucje prosimy o składanie pisemnych zamówień na wyżej wymienione artykuły. Oczekujemy również propozycji rozszerzenia dostępczej listy artykułów zgodnie z potrzebami.

Przykładowy wzór certyfikatu

Barwienie merceryzowanej przędzy bawełnianej barwnikami reaktywnymi

Bogumił Gajdzicki

Stowarzyszenie Polskich Chemików Kolorystów

1. Wstęp

Zakłady chemicznej obróbki wyrobów włókienniczych są jednymi z największej zużywających wody w procesach barwienia, a w konsekwencji odprowadzają znaczne ilości ścieków. Ocenia się, że typowy proces barwienia i wykończenia zużywa około 1000 litrów wody średnio na każdą tonę wyprodukowanej odzieży. Odprowadzane ścieki charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem, jako że każdy proces uszlachetniania wyrobu włókienniczego wymaga zastosowania innych barwników czy środków chemicznych w zależności od wymaganego koloru i jakości oczekiwanego wyrobu. Większość z stosowanych barwników syntetycznych nie jest degradowana w warunkach oczyszczalni biologicznych. W wielu pracach dotyczących oczyszczania ścieków po procesie wykończenia opisano metody usuwania barwnych zanieczyszczeń, innych substancji organicznych a także soli w takim stopniu, aby można było ponownie użyć oczyszczonej wody do kolejnego procesu. Opracowanie takiego procesu jest bardzo wymagające. Utleniające procesy degradacji barwników z zastosowaniem fotokatalizatorów (TiO_2/UV), ozonowanie, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, Photo-Fenton, prowadzą z całą pewnością do odbarwienia ścieków, ale nie ma pewności czy do zmniejszenia ich toksyczności. Przygotowując to opracowanie korzystano z szybko dostępnych źródeł internetowych w tym AI. Moją uwagę zwróciła napisana przez Natalia Pochroń, 19 maja 2026, w sieci ONET informacja dotycząca sztucznej inteligencji, którą zacytuję: „Cédric Villani jest jednym z najwybitniejszych matematyków i ekspertów od sztucznej inteligencji na świecie. Na jej rozwijaniu zjadł zęby i stwierdza wprost — to, co mówią nam o niej prezesi wielkich firm, jest kompletną bzdurą. Istnieje swego rodzaju ukryte przekonanie, że AI to byt. Ta iluzja jest podsycana przez wiele osób

i podmiotów, które chcą wywołać szum, strach i zdobyć uwagę mediów, aby ostatecznie uzyskać finansowanie i tak dalej. Niektórzy prezesi firm mówią: wyobrażam sobie moją firmę jako partnerstwo między ludźmi a AI. To kompletna bzdura! Nie ma czegoś takiego jak partnerstwo między człowiekiem a AI. AI to po prostu formuła matematyczna. Równie dobrze można by mówić o partnerstwie z papierem i ołówkiem. AI nie jest bytem, osobą, czymś inteligentnym ani świadomym. To tylko narzędzie matematyczne”. Z taką świadomością przedstawiono informacje dotyczące zasobów wody słodkiej na Naszym Globie jak również w Polsce oraz na tym tle zużycia wody w przemyśle włókienniczym pozyskane od AI.

Problem stosowania wody w przemyśle wykończenia wyrobów włókienniczych z punktu widzenia kosztu procesu staje się coraz bardziej istotny. Zapytano AI o „*jakie są i jak są wykorzystywane światowe czy europejskie zasoby wody słodkiej*” na co uzyskano informacje, iż wody słodkie są rozmieszczone bardzo nierównomiernie — zarówno globalnie, jak i w Europie — a ich wykorzystanie zależy od klimatu, gospodarki, demografii i infrastruktury. Na Ziemi około 97% wody stanowi woda słona, a tylko ok. 2,5–3% to woda słodka. Z tej części większość znajduje się w lodowcach i lądolodach, dużą część stanowi woda podziemna, a tylko mniej niż 1% zasobów słodkiej wody jest łatwo dostępne w rzekach, jeziorach i płytkich wodach gruntowych. Największe zasoby wody słodkiej posiadają m.in.: Brazylia — dorzecze Amazonki, Rosja, Kanada, Stany Zjednoczone, Chiny i Demokratyczna Republika Konga.

Woda słodka na świecie wykorzystywana jest głównie w takich sektorach jak:

Rolnictwo — największy użytkownik, globalnie około 70% poboru wody słodkiej trafia do nawadniania pól, hodowli zwierząt, produkcji żywności.

Przemysł - woda jest używana do chłodzenia elektrowni, w hutnictwie, chemii w tym produkcji barwników i przemyśle spożywczym. Największe zużycie przemysłowe występuje w krajach wysoko uprzemysłowionych. W krajach rozwiniętych zużycie wody słodkiej na mieszkańca jest wielokrotnie wyższe niż w krajach biedniejszych.

Gospodarstwa domowe - woda pitna, kanalizacja, higiena, gotowanie.

Europa ma stosunkowo dobre zasoby wodne, ale są one bardzo nierówne. Regiony zasobne w wodę dzięki relatywnie dużym opadom i liczny rzekom to: Norwegia, Szwecja, Finlandia i region alpejski. Regiony zagrożone niedoborem wody słodkiej, dotknięte tak zwanym stresem wodnym to: Hiszpania, Włochy, Grecja, południowa Europa i części Europy Środkowej.

Polska należy do państw o relatywnie małych zasobach wody na mieszkańca w Europie. Wynika to z powodu niewielkich opadów w części kraju, mała retencja, regulacja rzek i ocieplenia klimatu. Współczesne problemy związane z wodą słodką to ograniczony jej dostęp, zanieczyszczenie wody związane z działalnością przemysłu, nawozy sztuczne stosowane w uprawach, ścieki komunalne, mikroplastik. Postuluje się kilka sposobów poprawiających ochronę zasobów wodnych takich jak: retencja wody- mniej powierzchni pokrytych asfaltem i betonem, oszczędne nawadnianie, oczyszczanie ścieków, odsalanie wody morskiej, renaturyzacja rzek, ograniczanie zanieczyszczeń, odzysk i ponowne użycie wody.

Woda słodka w XXI w. staje się jednym z kluczowych zasobów strategicznych świata — podobnie jak energia czy żywność. W wielu regionach problemem nie jest tylko dostęp do wody, ale jej jakość, stabilność dostaw i odporność systemów wodnych na zmiany klimatyczne. Korzystanie ze źródeł czystej wody nie może być darmowe — z czasem będzie coraz więcej kosztować.

Jak w tym zakresie przedstawia się wykorzystanie wody w przemyśle włókienniczym? AI przedstawia to między innymi w sposób następujący. Przemysł włókienniczy należy do najbardziej wodochłonnych i zanieczyszczających wodę gałęzi przemysłu na świecie. Zużywa ogromne ilości wody zarówno do produkcji surowców (np. uprawy bawełny), jak i podczas obróbki tkanin - prania, bielenia, barwienia czy wykańczania materiałów.

Największe znaczenie w zużyciu wody ma uprawa bawełny. Bawełna wymaga intensywnego nawadniania, dużych ilości pestycydów i nawozów oraz stabilnych dostaw wody w klimacie suchym i gorącym. Szacuje się, że wyprodukowanie jednej koszulki bawełnianej może wymagać ok. 2–3 tys. litrów wody, a jednej pary jeansów nawet 7–10 tys. litrów. Do największych producentów bawełny należą: Chiny, Indie, Stany Zjednoczone, Pakistan oraz Uzbekistan. Jednym z najbardziej znanych przykładów negatywnych skutków nadmiernego wykorzystania wody przez przemysł włókienniczy jest degradacja Jeziora Aralskiego. W czasach Związku Radzieckiego ogromne ilości wody z rzek Amudaria i Syrdaria skierowano do nawadniania pól bawełny w Azji Centralnej. Skutkiem takiej polityki było dramatyczne zmniejszenie powierzchni jeziora, zasolenie gleb, burze pyłowe, załamanie rybołówstwa i problemy zdrowotne ludności. Największe obecnie centra produkcji tekstylnej na świecie to Bangladesz, Wietnam, Chiny i Turcja.

Przemysł tekstylny odpowiada za znaczną część przemysłowego zanieczyszczenia wód. Do rzek trafiają: barwniki, metale ciężkie, detergenty, mikroplastik, związki fluorowane i toksyczne rozpuszczalniki. Szczególnie problematyczne są włókna syntetyczne: poliester, poliamid, poliakrylonitryl, które podczas ich prania uwalniają mikroplastik trafiający do mórz i oceanów.

Ostatnio dyskutowanych jest kilka rozwiązań mających na celu ograniczenie ilości wyrobów włókienniczych trafiających zbyt wcześnie do odpadów.

- Fast fashion a zużycie wody. Fast fashion to istniejący obecnie trend kilkakrotnego w

czasie roku tworzenia nowych, zgodnych z trendem mody kolekcji co powoduje bardzo szybki wzrost produkcji odzieży, krótszy czas użytkowania ubrań, wzrost zużycia wody, energii i wzrost ilości odpadów tekstylnych. Najwięksi globalni producenci odzieży często lokują produkcję w krajach z taną siłą roboczą, mniej wymagającymi normami środowiskowymi i ograniczoną kontrolą ścieków, co przenosi problem zużycia wody i odprowadzanie ścieków w rejony produkcji odzieży. Lecz często śledząc doniesienia Państwowej Inspekcji Sanitarnej dowiadujemy się o wielokrotnym przekroczeniu na takiej odzieży, w tym dla małych dzieci, zawartości niedopuszczalnych w UE środków zakazanych. Problem oczywiście jest złożony i wynika z zamawiania przez sieci handlowe odzieży w możliwie najniższej, konkurencyjnej cenie. Braku świadomości zamawiającego jakim wymaganiom powinien odpowiadać wyrób włókienniczy importowany do krajów UE. Przy tak intensywnym nagłaśnianiu problemu świadomość oczywiście rośnie, ale definiowanie wymogów w odniesieniu do sprowadzanej odzieży wymaga jednak znajomości przyczyn występowania tych zagrożeń. I wreszcie braku lub bardzo pobieżnej kontroli jakości takich wyrobów na granicy UE.

- **Nowoczesne technologie** dotyczą zarówno realizacji procesów technologicznych jak i rozwiązań dotyczących zamkniętych obiegów wody, recyklingu ścieków, barwienia bez użycia wody stosując CO₂ pod wysokim ciśnieniem, oczyszczalnie przemysłowe. Przykładem takich nowych rozwiązań może być druk cyfrowy, szczególnie pigmentami, który w najnowszym wydaniu nie wymaga prania po druku. W przypadku stosowania barwników reaktywnych wymaga tradycyjnego procesu parowania lub obróbki termicznej i końcowego prania.

- **Ekologiczne regulacje i certyfikaty.** Popularne systemy: OEKO-TEX 100, Better Cotton, Global Organic Textile Standard. Z jednej strony eliminują lub ograniczają na terenie UE stosowanie barwników i środków chemicznych powodujących zagrożenie dla człowieka i środowiska a z drugiej strony dają argument dla służb celnych i UOKiK kontroli

dostępnych w handlu wyrobów włókienniczych.

W Unii Europejskiej produkcja tekstylna jest regulowana środowiskowo, obowiązują normy oczyszczania ścieków i rośnie nacisk na gospodarkę obiegu zamkniętego. Jednocześnie Europa importuje ogromną część odzieży z Azji, więc „ślad wodny” europejskiej konsumpcji często powstaje poza Europą. Kluczowym wyzwaniem nie jest tylko samo zużycie wody, ale zużycie jej w regionach już cierpiących na niedobory, zanieczyszczanie rzek i wód gruntowych, brak oczyszczania ścieków i skala nadprodukcji odzieży. Dla porównania jedna duża elektrownia może zużywać więcej wody niż cały sektor włókienniczy w Polsce, ale przemysł tekstylny generuje relatywnie bardziej „chemicznie trudne” ścieki. To, dlatego jego wpływ środowiskowy jest oceniany bardziej przez jakość ścieków, ich toksyczność, lokalne obciążenie rzek niż przez samą objętość pobieranej wody.

Ile wody zużywa produkcja tekstyliów?

Przybliżone wartości technologiczne barwienia 1 kg tkaniny bawełnianej zużywało dawniej nawet 100–150 litrów wody. Obecnie nowoczesne instalacje wymagają 30–60 litrów, a najnowsze systemy jeszcze mniej wody.

Dokładne dane dla samego przemysłu włókienniczego w Polsce są trudniejsze do znalezienia niż dla całego przemysłu, ponieważ Główny Urząd Statystyczny zwykle niestety publikuje dane zbiorcze dla większych sektorów przemysłowych. Natomiast można dość dobrze oszacować skalę biorąc za punkt odniesienia całe zużycie wody w Polsce. Według danych GUS całkowite zużycie wody w Polsce wynosi ok. 9–10 km³ rocznie, przemysł zużywa ok. 68–72% tej ilości, czyli około 6,5–7 mld m³ rocznie [1]. Jednocześnie większość tej wody zużywa energetyka do chłodzenia elektrowni, przemysł ciężki i chemiczny. Przemysł włókienniczy w Polsce jest dziś dużo mniejszy niż np. w latach 70.–90., ale nadal istotny w regionach takich jak Łódź i województwo, województwo śląskie i część Wielkopolski i Dolnego Śląska. Szacunkowo na tle całego polskiego przemysłu, tekstylia stanowią niewielki udział prawdopodobnie poniżej 1% całkowitego krajowego zużycia

wody, ale lokalnie mogą być bardzo dużym odbiorcą wody przemysłowej. To oznacza orientacyjnie od kilkunastu do kilkudziesięciu milionów m³ rocznie,

Jak zmieniły się właściwości barwników związane z oszczędnością wody?

Zmiany właściwości nowoczesnych barwników i technologii barwienia są jednym z głównych sposobów ograniczania zużycia wody w przemyśle włókienniczym. Ewolucja dotyczyła zarówno samej chemii barwników, jak i metod ich aplikacji. Tradycyjne barwienie wymagało dużych objętości kąpieli wodnych, wielokrotnego płukania, utrwalania barwnika chemikaliami. Problem polegał na tym, że znaczna część barwnika nie wiązała się trwale z włóknem, pozostawała w kąpeli co wymagało dodatkowego płukania, a w konsekwencji odprowadzania dużych objętości silnie zanieczyszczonych i barwnych ścieków. Nowoczesne barwniki reaktywne lepiej penetrują włókna i charakteryzują się wyższym stopniem przereagowania z włóknem. W efekcie mniej niewykorzystanego barwnika, mniej płukań, mniejsze zużycie wody. Szczególnie ważne było to dla włókien celulozowych i ich mieszanek z włóknami syntetycznymi.

Barwniki reaktywne nowej generacji reagują z włóknem powyżej 80% i stwarzają możliwość stosowania w mniejszej objętości kąpieli, i w niższych temperaturach. To ograniczyło zużycie wody, energii i soli technologicznych. Ma to ogromne znaczenie dla oczyszczania wody. Dzisiejsze barwniki często mają wyższą wydajność kolorystyczną. Pojawiły się systemy projektowane specjalnie do barwienia pianowego, natryskowego, cyfrowego druku tekstyliów. Takie technologie wymagają użycia wielokrotnie mniej wody niż klasyczne barwienie kąpielowe.

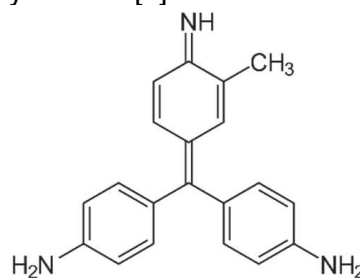
Współczesne regulacje wymusiły ograniczenie użycie metali ciężkich, toksycznych amin aromatycznych, części rozpuszczalników organicznych. W Unii Europejskiej obowiązują bardzo restrykcyjne normy chemiczne, m.in. system REACH.

Mimo postępu przemysł tekstylny nadal jest jednym z największych źródeł

zanieczyszczeń wód, tania produkcja w części krajów rozwijających się nadal wykorzystuje starsze technologie. Mikroplastik z włókien syntetycznych pozostaje poważnym problemem. Nowoczesne barwniki są projektowane tak, aby w wyższym stopniu wyczerpywały z kąpeli na włókno, wymagały mniej płukań, lepiej wiązały się chemicznie z włóknem, a ich aplikacja odbywała się przy niższej temperaturze, generowały mniej ścieków i umożliwiały recykling wody procesowej. To obecnie jeden z najważniejszych kierunków transformacji przemysłu włókienniczego w stronę gospodarki obiegu zamkniętego.

2. Szwajcarscy producenci barwników dla przemysłu włókienniczego.

Historia firmy CIBA jest bardzo ważna dla rozwoju światowego przemysłu barwników syntetycznych, chemii przemysłowej i późniejszej farmacji. Firma wywodzi się z XIX-wiecznej szwajcarskiej rewolucji chemicznej. CIBA powstała w Bazylei, jednym z najważniejszych centrów europejskiej chemii barwników. Za początek firmy uznaje się rok 1859, gdy Alexander Clavel rozpoczął produkcję syntetycznej fuksyny dla przemysłu jedwabniczego. Również w 1858 r. Jakub Natanson pracując w Dorpacie otrzymał podobny barwnik utleniając anilinę, ale nie zainteresował się dalszym przemysłowym wykorzystaniem swego wynalazku [2].



W drugiej połowie XIX wieku gwałtownie rozwijały się syntetyczne barwniki anilinowe, chemia organiczna i włókiennictwo. To był moment przejścia od naturalnych barwników takich jak indygo, koszenila i purpury do nowoczesnych barwników syntetycznych. W 1884 r. przedsiębiorstwo zostało przekształcone w spółkę „Gesellschaft für Chemische Industrie Basel” (Spółka Przemysłu

Chemicznego w Bazylei). Oficjalnie nazwę firma CIBA przyjęła dopiero w 1945 r. Pod koniec XIX i na początku XX wieku CIBA stała się jednym z największych producentów barwników, chemikaliów i środków dla przemysłu włókienniczego. Firma produkowała barwniki do barwienia bawełny, jedwabiu, wełny i później także włókien syntetycznych. Rozwój firmy był ściśle związany z rozwojem europejskiego włókiennictwa i chemii organicznej. CIBA odegrała ogromną rolę w rozwoju syntetycznych barwników, chemii dla włókiennictwa, nowoczesnej farmacji oraz szwajcarskiego przemysłu chemicznego. To przykład firmy, która zaczęła od barwników dla tkanin, stworzyła zaawansowaną chemię przemysłową, weszła do farmacji i stała się częścią jednego z największych koncernów farmaceutycznych świata. O ekspansji rozwoju firmy może świadczyć jej obecność w Polsce. Tutaj w latach **1891–1899** firmę produkującą barwniki założyli w Pabianicach chemicy Ludwik Schweikert i Robert Resiger. W 1899 roku firma ta połączyła się ze szwajcarskim koncernem chemicznym CIBA. W okresie międzywojennym (1921–1939) Pabianickie Towarzystwo Akcyjne Przemysłu Chemicznego z sukcesem produkowało dalej barwniki i przetwory farmaceutyczne [3].

Na przełomie XIX i XX wieku wiele firm produkujących barwniki odkryło, że chemia barwników i chemia leków są technologicznie bardzo podobne. CIBA AG rozpoczęła produkcję farmaceutyków około 1900 r. To był typowy kierunek dla szwajcarskich i niemieckich koncernów chemicznych - od barwników przez chemię przemysłową do leków.

Podobną działalność prowadziła inna firma szwajcarska Geigy (J R. Geigy AG), której historia sięga 1758 roku, kiedy Johann Rudolf Geigy-Gemuseus zakłada w Bazylei firmę handlującą chemikaliami, lekami i barwnikami. Podobnie jak Ciba w 1859 roku firma rozpoczyna produkcję syntetycznej fuksyny (czerwieni anilinowej), przestawiając się z surowców naturalnych na barwniki syntetyczne. 1901 rok przekształcenie w spółkę akcyjną, która w 1914 roku przyjmuje oficjalną nazwę **J.R. Geigy AG**. 1938 rok otwarcie działu badań farmaceutycznych, co zaowocowało wynalezieniem leków takich jak Butazolidin

(1949) czy Tofranil (1958). W 1939 roku badacz firmy Geigy, Paul Müller, odkrywa owardobójcze właściwości DDT, za co otrzymuje Nagrodę Nobla w 1948 roku [4].

Fuzja Ciba-Geigy

W 1970 r. CIBA połączyła się z firmą Geigy tworząc Ciba-Geigy. Nowa firma była, w tym czasie, jednym z największych koncernów chemiczno-farmaceutycznych świata. Działała w obszarach farmacji, agrochemii, chemii przemysłowej, barwników i dodatków do tworzyw sztucznych. Ciba-Geigy należała do światowych liderów chemii tekstylnej i co należy szczególnie podkreślić, rozpoczęło propagowanie w przemyśle włókienniczym wdrażania nowoczesnych technologii barwienia oferowanymi w firmie barwnikami i środkami pomocniczymi. Dzisiaj wielokrotnie sprzedaż barwnika czy innego włókienniczego środka chemicznego wymaga udzielenia szczegółowej instrukcji ich zastosowania i potwierdzenia uzyskania oczekiwanych efektów. To istotna obserwowana obecnie zmiana wynikająca z braku dostatecznej wiedzy wśród ludzi odpowiedzialnych za realizowane procesy chemicznej obróbki włókna w wielu małych firmach, a więc konieczność uzyskania odpowiedniego instruktażu. Nie było do pomyślenia, aby w dużych kombinatach włókienniczych XX w. zatrudnieni tam technolodzy wykończalnicy nie radzili sobie z wdrażaniem nowych innowacyjnych technologii. Oczywiście korzystano z pewnej formy konsultacji wysokiej klasy doradców ze strony firm dostarczających barwniki, szczególnie nowej generacji. Na wydziale wykończalni pracowali wówczas absolwenci Politechniki Łódzkiej wydziału Włókienniczego bądź jeszcze wcześniej Technikum Włókienniczego posiadający gruntowną wiedzę w zakresie wykonywanego zawodu. Obecnie brak w Łodzi i okolicach takich ośrodków, gdzie można uzyskać wiedzę w tym zakresie. Firma Ciba-Geigy rozwijała barwniki reaktywne, technologie barwienia włókien celulozowych, środki poprawiające trwałość wybarwień, chemię wspomagającą ograniczanie zużycia wody i energii.

Trzecią firmą działającą w Szwajcarii w sektorze produkcji barwników była firma

Sandoz. Jej początki są ściśle związane z rewolucją w syntezie barwników organicznych. Firma została założona w 1886 roku w Bazylei przez Alfreda Kerna i Edouarda Sandoza jako mała spółka *Kern & Sandoz*. W początkowym okresie działalności przedsiębiorstwo koncentrowało się wyłącznie na chemii barwników, ze szczególnym uwzględnieniem syntezy syntetycznego błękitu alizarynowego oraz auraminy. W latach 1900–1950 laboratoria firmy Sandoz wypracowały nowe metody syntezy zaawansowanych barwników, w tym barwników siarkowych i alizarynowych, które zrewolucjonizowały technologię barwienia włókien. W 1995 roku Sandoz wydzielił swój dział chemikaliów specjalistycznych, tworząc **Clariant**. W 1997 roku Clariant połączył się z działem chemikaliów specjalistycznych, który został wydzielony z **Hoechst AG** w Niemczech.

Dynamiczny rozwój syntezy organicznej pozwolił firmie Sandoz na wyjście poza branżę tekstylną. Już w 1895 roku Sandoz zsyntetyzował swój pierwszy lek – **antypirynę** (środek przeciwgorączkowy). To zapoczątkowało trwającą do dziś transformację firmy w giganta farmaceutycznego. Firma wdrożyła przełomowe metody produkcji antybiotyków – **Penicylina (1951)** – na skalę przemysłową.

Powstanie Novartis

W 1996 roku doszło do wielkiej fuzji Ciba-Geigy z firmą Sandoz, w wyniku której powstał koncern Novartis. Nazwa Novartis pochodziła od łacińskich terminów „*novae artes*” (nowe umiejętności). Była to jedna z największych fuzji przemysłowych lat 90. Po utworzeniu Novartis działalność chemiczna niezwiązana z farmacją została w 1997 r. wydzielona jako „**Ciba Specialty Chemicals**”. Firma nadal produkowała barwniki, dodatki do tworzyw, środki chemiczne dla papiernictwa i dla włókiennictwa. W 2008 roku BASF przejął **Ciba Specialty Chemicals**. W praktyce oznaczało to włączenie większości technologii i produktów dawnej firmy CIBA do struktur BASF i konsolidację światowego rynku chemii specjalistycznej. Novartis jest jedną z największych firm farmaceutycznych na świecie i w 2024 roku była ósmą co do wielkości pod względem przychodów.

Huntsman Corporation to globalny producent chemikaliów specjalistycznych, założony w 1970 roku w USA przez braci Jona i Blaine'a Huntsmanów. Od produkcji opakowań firma urosła do rangi międzynarodowego giganta zatrudniającego ok. 9 tys. osób, tworzącego poliuretany i zaawansowane materiały m.in. dla branży lotniczej i budowlanej. W 1970 r. firma wprowadza na rynek pierwsze innowacyjne opakowania do fast-foodów, w tym kultowe pudełka styropianowe. Powstała w 1982 r. Huntsman Chemical Corporation z siedzibą w Salt Lake City (Utah) zaczyna dynamicznie przejmować zakłady chemiczne i rozszerzać portfolio o tworzywa sztuczne. W latach 90. XX w. Huntsman staje się jednym z największych prywatnych koncernów chemicznych na świecie, przejmując m.in. giganta *Texaco Chemical* oraz europejskie i australijskie aktywa firmy *ICI*. Obecnie siedziba korporacji mieści się w The Woodlands w Teksasie. Koncern obsługuje tysiące klientów przemysłowych z sektora motoryzacyjnego, budowlanego (np. izolacje *Huntsman Building Solutions*), lotniczego i energetycznego. Dział **Huntsman Textile Effects (TE)** był wiodącym globalnym dostawcą barwników, chemikaliów i atramentów cyfrowych dla przemysłu tekstylnego. W lutym 2023 roku Huntsman Corporation sfinalizował sprzedaż całej dywizji **Textile Effects** na rzecz firmy **Archroma**. W latach 2000–2020 Huntsman słynął z przełomowych technologii barwienia, które znacznie ograniczały zużycie wody, np. innowacyjnej gamy barwników reaktywnych **AVITERA SE** oraz zrównoważonych rozwiązań **HIGH IQ**. Zbudował swoje silne ramy dzięki aktywnej ekspansji – w 2010 r. przejęto indyjską część **Metrochem Industries**, a w portfolio znalazła się spuścizna dawnych pionierów rynku włókienniczego (m.in. barwniki oparte na technologiach dawnego Ciba Specialty Chemicals). Po przejęciu przez Archromę, zakłady zostały zintegrowane w ramach jednego z największych światowych producentów specjalistycznej chemii dla włókiennictwa. Przed przejęciem, produkty barwiące i tekstylne Huntsman trafiały bezpośrednio do ponad 10000 klientów w 80–90 krajach. Dystrybucja odbywała się za pośrednictwem sieci

autoryzowanych partnerów chemicznych. Obecnie aktywa, portfele produktów i technologie produkcji barwników dawnego Huntsman Textile Effects są w pełni rozwijane i dystrybuowane przez grupę **Archroma**. Wycofano produkcję barwników z grupy Novacron H, a uwagę przekierowano na Novacron LS. Zastąpiono dwa barwniki Cibacron LS z tej grupy, dwoma bardziej ekonomicznymi w stosowaniu. Dotyczy to barwników **Novacron Yellow LS-RN i Novacron Red LS-BN**, które wykazują lepsze właściwości w procesie barwienia szczególnie wyrobów poliestrowo bawełnianych.

Barwienie barwnikami reaktywnymi tak zwanymi "gorącymi" traci obecnie na znaczeniu w stosowaniu ze względu na duże zużycie energii, wody i relatywnie długi czas procesy barwienia. Biorąc to pod uwagę technolodzy częściej obecnie decydują się na zastosowanie barwników pozwalających na uzyskanie właściwych efektów barwienia w optymalnych kosztach. Reaktywne barwniki "gorące" jeszcze sprzedawane są w ilości ok. 20000 ton rocznie. Stosowane są głównie do barwienia wyrobów niszowych takich jak barwienie w kolorze czystych czerwieni, barwienie ciężkich tkanin i wyrobów wiskozowych.

3. Ekologiczne i ekonomiczne barwienie wyrobów włókienniczych

Eksport tekstyliów i wyrobów tekstylnych jest ważnym, choć niedominującym elementem polskiego handlu zagranicznego. Pozytywnym zjawiskiem obserwowanym w ostatnim czasie w przemyśle włókienniczym jest wysoka elastyczność producentów wyrobów o wysokiej jakości (59% wyrobów tekstylnych i 44% wyrobów odzieżowych jest kierowanych na eksport). Według danych Eurostatu wartość eksportu wyrobów włókienniczych z Polski wynosiła odpowiednio: w 2021 r. 2,9 mld EUR, w 2022 r. 3,17 mld EUR i w 2023 r. 3,07 mld EUR. Dla porównania, eksport odzieży z Polski osiągnął w 2024 r. wartość około **12,7 mld EUR**, co pokazuje, że znaczna część polskiego sektora modowego opiera się na wyrobach gotowych, a nie samych materiałach włókienniczych wytworzonych czy przetworzonych w kraju.

Globalne zużycie barwników wynosi około 9,9 mln ton rocznie, to około 10 000 różnych barwnych związków chemicznych (dane dla 2022 r.). Przemysł włókienniczy zużywa około 60–70% wszystkich produkowanych barwników, co czyni go zdecydowanie największym odbiorcą. Wartość światowego rynku barwników i pigmentów przekroczyła 44 mld USD w 2025 r., a segment barwników odpowiada za około 68% tej wartości. Sam sektor włókienniczy odpowiada za około 63% zastosowań barwników.

Szacuje się, że przemysł tekstylny zużywa rocznie około 1,2–1,3 mln ton barwników tekstylnych. Z ogólnej ilości związków barwnych stosowanych w przemyśle włókienniczym nawet do 200 000 ton tych związków każdego roku odprowadzanych jest do ścieków. Stanowi to w zależności od grupy użytkowej barwników od 10 do nawet 50 % ilości użytej w procesie. Najwięcej barwników zużywa się do barwienia poliestru – około 40–50% całkowitego zużycia barwników, bawełny – około 35%, a resztę do pozostałych włókien (wełna, jedwab, akryl, poliamidy) [5]. Wymagania prawne na terenie UE obligują do odbarwienia ścieków przed odprowadzeniem ich do oczyszczalni publicznych.

Do barwienia włókien celulozowych stosuje się obecnie głównie barwniki reaktywne. Tradycyjnie barwienie wykonuje się przy dużej krotności kąpieli w granicach 1:12 do 1:15 to znaczy, iż jedną tonę wyrobu włókienniczego barwi się w 12 do 15 tonach kąpieli wodnej. Chociaż obecnie dostępne barwniki reaktywne pozwalają na uzyskanie relatywnie wysokiego stopnia ich przereagowania z grupami hydroksylowymi włókna celulozowego, to większość stosowanych, tańszych barwników reaguje w mniejszym stopniu i w kąpieli po barwieniu pozostaje blisko 30% użytego barwnika. Oczyszczanie ścieków po barwieniu barwnikami reaktywnymi sprawia szczególne trudności ze względu na duże zasolenie tych kąpeli siarczanem lub chlorkiem sodu i obecnością innych środków chemicznych niezbędnych w procesie barwienia i wykończenia. Przykładowo połówkowy czas hydrolizy barwnika Reactive Blue 19 wynosi około 46 lat przy pH 7 i temperaturze 25°C [6]. Do ogrzania dużej objętości kąpieli do

temperatury niezbędnej dla reakcji barwnika z włóknem celulozowym konieczna jest znaczna ilość energii. 60 – 70% masy wytwarzanych na świecie barwników syntetycznych stanowią barwniki azowe.

Obecnie w REACH zarejestrowanych jest około 800 indywidualnych struktur barwników. Czeski producent barwników Synthesia do 2018 roku zarejestrował około 60 substancji, co może być równoznaczne z około 120 komercyjnych związków barwnych i kosztowało to 3,5 do 4,0 milionów EUR [6].

Szacuje się, że całkowity koszt technologii barwienia wyrobu włókienniczego barwnikami reaktywnymi składa się z różnych wydatków, z których główne to:

- 42% prace laboratorium w przygotowaniu recepty,
- 29% koszt barwników i środków chemicznych,
- 6% koszt wody,
- 12% energia,
- 6% ochrona środowiska,
- 5% obsługa, robocizna.

Proces barwienia, szczególnie barwnikami reaktywnymi nie należy do przyjaznych środowisku ze względu na konieczność stosowania znacznych ilości soli mineralnych, środków alkalicznych, związków powierzchniowo czynnych i relatywnie dużej ilości barwnika pozostającego w kąpieli barwiącej [7]. Okresowy proces barwienia wymaga stosowania dużych ilości czystej, zmiękczonej wody. Taka sama ilość wody odprowadzana jest zwykle do ścieków powodując znaczne trudności w procesie oczyszczania w oczyszczalniach biologicznych [8]. Dlatego kładzie się duży nacisk na poprawę ekologiczności procesu barwienia włókien celulozowych barwnikami reaktywnymi [9]. Wyrażne sugestie i wskazanie kierunków zminimalizowania tego problemu zarysowano publikując dokument Unii Europejskiej IPPC z załącznikiem w postaci BAT (najlepszych możliwych do zastosowania technologii/technik).

Ze względu na popularność stosowania barwników reaktywnych do barwienia włókien celulozowych, zarówno w skali globalnej jak i w Polsce, bardzo istotny jest problem minimalizacji wpływu technologii ich stosowania na środowisko naturalne, ale również

użytkowników wyrobów odzieżowych barwionych tymi barwnikami. Dyskusja w tym zakresie ukierunkowana jest głównie na następujące problemy: [10]

- poszukiwanie barwników reaktywnych o optymalnych właściwościach do konkretnego procesu realizowanego dla danego wyrobu włókienniczego i w zakładzie o określonych możliwościach, co wyraźnie jest widoczne w opisaney wyżej filozofii produkcji barwników,
- modernizacja i unowocześnianie urządzeń do realizacji procesu barwienia,
- chemiczna modyfikacja włókna celulozowego, głównie kationizacja, pod kątem zmiany warunków barwienia,
- zastępowanie koniecznych w kąpieli barwiącej agresywnych dla środowiska środków chemicznych bardziej przyjaznymi produktami, stosowanie enzymów,
- szerokie prace związane z odzyskaniem wody do ponownego jej wykorzystania i jej oczyszczaniem przed odprowadzeniem do otwartych zbiorników wodnych poprzez oczyszczalnie.

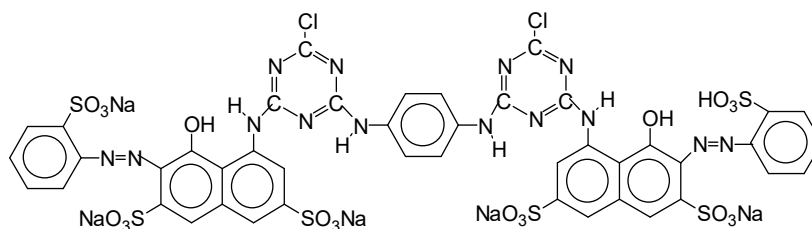
3.1. Poszukiwanie optymalnych rozwiązań w zakresie barwników reaktywnych

W odniesieniu do lat drugiej połowy XX wieku obserwuje się znaczące zmiany w budowie i właściwościach barwników reaktywnych [11]. Barwniki te są dedykowane do barwienia włókien celulozowych, zawierają w swej cząsteczce głównie takie grupy reaktywne jak układ s-triazyny z atomami chloru lub fluoru lub innymi grupami ulegającymi wymianie, układ siarczanoetylosulfonylowy lub trichloropirymidyny. Układy reaktywne o wzrastającej aktywności w reakcji z grupą hydroksylową włókna celulozowego można uszeregować następująco: trichloropirymidynowy, aminochloro-s-triazyny, siarczanoetylosulfonylowy, aminofluoro-s-triazyny, difluorochloropirymidyny i dichloro-s-triazyny. Stopień przereagowania barwnika w dużym stopniu zależy od

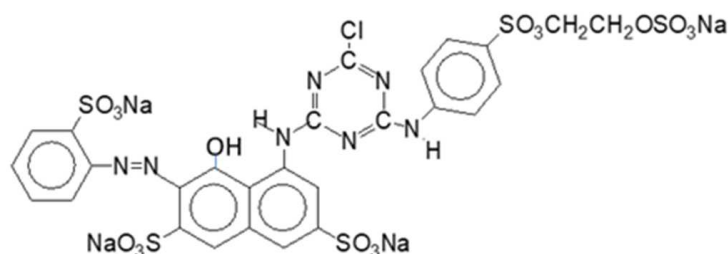
grupy reaktywnej, budowy chromoforu barwnika i warunków barwienia.

Nowoczesne barwniki reaktywne zawierają obecnie więcej jak jedną, taką samą - homobireaktywne lub różną - heterobireaktywne - grupę reaktywną [12-14]. Ich prawdo-

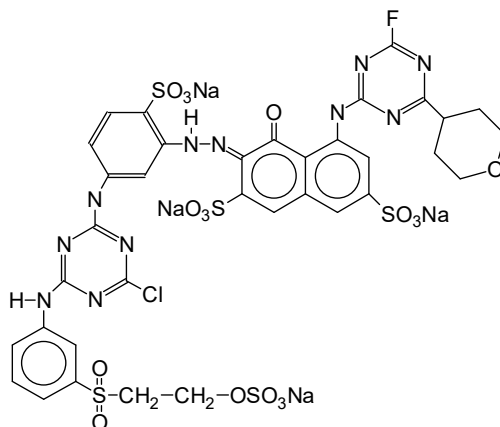
podobieństwo reakcji z aktywną grupą hydroksylową włókna się zwiększa, jednocześnie pozostaje mniej substancji barwnej w kąpeli po barwieniu. Przykładowe wzory barwników reaktywnych przedstawiono na rys. 1-3.



Rys. 1. Wzór chemiczny barwnika reaktywnego **C.I. Reactive Red 120**, barwnik reaktywny zawierający dwa układy reaktywne monochlorotrazynyłowe.



Rys. 2. Wzór chemiczny barwnika reaktywnego **C.I. Reactive Red 240**, barwnik reaktywny zawierający dwa różne układy reaktywne monochlorotrazynyłowy i siarczanoetylosulfonyłowy.



Rys. 3. Wzór chemiczny barwnika reaktywnego z trzema grupami reaktywnymi [12].

Odmianą grupę barwników reaktywnych do stosowania w procesie barwienia wyrobów celulozowych, w kąpeli neutralnej o pH 6,5-7,5 stosując środki buforowe, stanowią barwniki Papizolon HT. Są to barwniki mononikotynotrójazynyłowe, które nie wymagają stosowania w kąpeli agresywnych środków

alkalicznych takich jak wodorotlenek lub węglan sodu. Polecane są głównie do barwienia wyrobów z udziałem włókien celulozowych z poliestrem w kąpeli o temperaturze powyżej wrzenia.

3.2. Barwniki Cibacron LS i ich następna generacja Novacron LS.

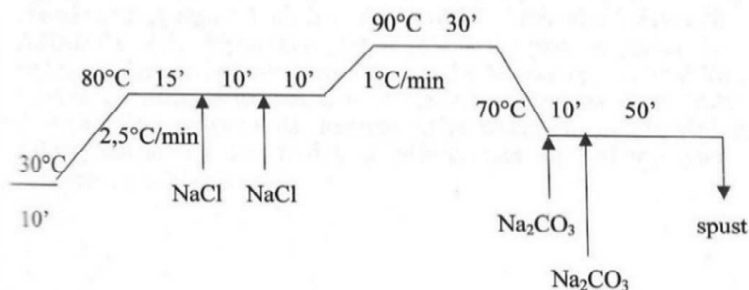
W ramach pracy dyplomowej magisterskiej [18] realizowanej w ówczesnej Katedrze Chemicznej Obróbki Włókna na Wydziale Inżynierii i Marketingu Tekstyliów, dawniej Wydział Włókienniczy Politechniki Łódzkiej dokonano analizy przydatności siedmiu nowoczesnych barwników reaktywnych do barwienia merceryzowanych nici bawełnianych. Konieczność wykonania takiej analizy wynikała z wymiany aparatów barwarskich w Fabryce Nici Ariadna w Łodzi, gdzie praca była realizowana.

Dotychczas stosowane barwniki Cibacron zastąpiono nieco zmodyfikowaną serią barwników Novacron LS. Barwniki reaktywne z serii **Novacron LS** (Low Salt) firmy Huntsman Textile Effects to innowacyjne barwniki bi-reaktywne, zaprojektowane specjalnie w celu zwiększenia efektywności i ekologiczności procesu barwienia. Wymagają jedynie około 25-33% ilości soli potrzebnej dla standardowych barwników reaktywnych. Zapewniają doskonałą reprodukcję odcieni. Jak wskazują producenci tych barwników są one niewrażliwe na zmiany objętości kąpieli (liquor ratio - LR), co czyni je idealnymi do barwienia w aparatach barwarskich o różnej objętości kąpieli. Oferują dobrą odporność na pranie i

inne czynniki zewnętrzne. Barwniki Novacron LS są przeznaczone głównie do barwienia **włókien celulozowych** (bawełna, wiśkoza) oraz ich mieszanek, szczególnie tam, gdzie priorytetem jest ochrona środowiska i oszczędność wody oraz elektrolitów. Novacron LS to rozwiązanie "eco-friendly", które pozwala na uzyskanie wysokiej jakości wybarwień przy znacznie zmniejszonym zanieczyszczeniu ścieków.

Barwniki Cibacron LS, zastosowane w pracy dyplomowej, posiadały dwie lub trzy grupy reaktywne w cząsteczce. Właściwości tej grupy barwników, ich dystrybutor w Polsce firma Swisscolor CIBA opisał w materiałach seminaryjnych, Szczyrk 1998 r. Dzięki odpowiedniemu doborowi grup reaktywnych hydroliza barwnika w czasie procesu barwienia kształtuje się na poziomie 16% a powyżej 80% reaguje z włóknem.

Do barwienia użyto bawełnianych nici merceryzowanych i bielonych, skręconych z 12 przędz o masie liniowej 20 tex każda. Barwiono pasemka nici o masie 5g w barwiarce laboratoryjnej Ahiba Nuance TS w kąpieli o krotności LR 1:10; 1:15; 1:20; 1:25 i 1:30. Wszystkie wybarwienia wykonano w trzech intensywnościach stosując 1, 2 i 3% barwnika w stosunku do włókna. Przedstawiony poniżej przebieg procesu zapisano w urzędzeniu sterującym barwiarki laboratoryjnej.



Rys. 4. Schemat procesu barwienia barwnikami Cibacron LS w funkcji czasu i temperatury kąpieli.

Ilość chlorku sodu i węglanu sodu użyte podczas barwienia przedstawiono w tabeli poniżej.

Tabela 1. Ilość elektrolitu i węglanu sodu użyta w procesie barwienia.

Wybarwienie	NaCl, g/dm ³		Na ₂ CO ₃ , g/dm ³	
1%	5,0	5,0	3,0	7,0
2%	7,5	7,5	4,0	8,0
3%	12,5	12,5	5,0	9,0

Dodana ilość węglańu sodu zapewniała pH kąpieli w czasie barwienia na poziomie 10,5. Po barwieniu próbki płukano zimną wodą i neutralizowano w wodnym roztworze kwasu octowego. W końcowym etapie każdą próbkę prano w kąpieli wodnej zawierającej 1 g/dm³ ALBAPOLU WL w czasie 30 min, płukano w cieplej i następnie zimnej wodzie, odwadniano i suszono.

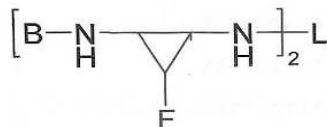
Zabarwione nici odpowiednio nawijano na karton nie zawierający rozjaśniaczy optycznych przygotowując odpowiednie próbki do pomiaru barwy na spektrofotometrze. Dla każdego z wybarwień wyznaczono wartość K/S dla maksymalnej długości fali światła

oraz współrzędne barwy L*, a* i b* dla światła D₆₅ i podstawowego obserwatora kolorymetrycznego o kącie 2°. Pomiary wykonano na spektrofotometrze Spectroflash SF 600 firmy Datacolor, stosując otwór pomiarowy o średnicy 26 mm i program komputerowy Helios 2000. Takie warunki pomiarów kolorymetrycznych stosowane są powszechnie w zakładzie, gdzie wykonano pracę. Zastosowanie nietypowego obserwatora kolorymetrycznego wynika z faktu, iż barwiona nitka w wymiarze poprzecznym jest niewielkich rozmiarów.

Tabela 2. Charakterystyka zastosowanych barwników Cibacron LS użytych w badaniach /oznaczone */ oraz katalogowe informacje o ich kolorystycznych odpowiednikach z grupy Novacron.

Nazwa barwnika Cibacron*/ Npvacron	Rozpuszczalność w temp 30°C i 70 °C			Wyczerpanie %	Prze- rea- gowanie %	Światło			Pranie /95°C/	
	bez dod.	Na Cl 30 g/l	NaCl 30 g/l i Na ₂ C O ₃ 15 g/l			1/25 SD	1/1 SD	2/1 SD	Zmian a barwy	Za- bru- dze- nie CO
Yellow LS-R*				91	78					
Yellow LS-RN	100	30	30	92	74	4-5	6	6	5	4
Yellow LS-4G*	60/8 0	30	30	88	78	-3	4-5	5-6	5	5
Orange LS-BR*				91	78					
Red LS-B*				91	78					
Red LS-6G*				94	80	3	4-5	5	5	4
Brill. Blue LS-G*	100	30	30	80	74	3-4	6	6-7	4-5	4
Blue LS-3R*	80	30	30	90	83	5-6	6-7	6-7	5	4

Barwniki reaktywne z układem reaktywnym fluorotriazynowym po raz pierwszy zastosowano w firmie Ciba-Geigy w 1978 r. w asortymencie Cibacron F. Kolejnym etapem produkcji barwników z dwoma układami reaktywnymi fluorotriazyny i siarczanoetylosulfonylowym w cząsteczce były barwniki Cibacron C, które wprowadzono do stosowania w 1988 r. W 1992 r. ukazały się do stosowania barwniki Cibacron LS a następnie Novacron LS, które są otrzymywane przez połączenie dwóch grup chromoforowych barwnika za pomocą diaminy alifatycznej lub aromatycznej [11].

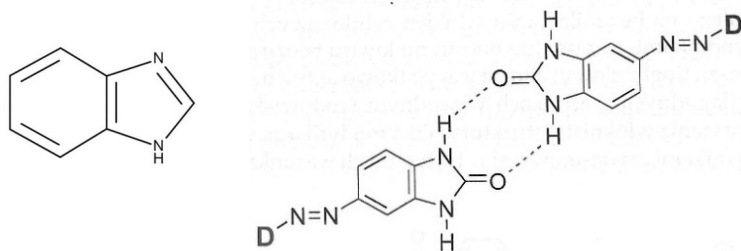


gdzie L = Alkil, Aryl

Istotną rolę w cząsteczce barwnika odgrywają układy zapewniające silną agregację. Takim układem może być reszta benzimidazolonu lub podobne układy imidowe, które pomimo niewielkich rozmiarów cząsteczki

wykazują równie dobre właściwości jak barwniki disazowe. Powodują one wzrost substancyjności barwnika. W przypadku barwników reaktywnych otrzymano produkty o zwiększonym

szonym powinowactwie, pozwalające na użycia mniejszej ilości soli w kąpeli barwiącej [15].

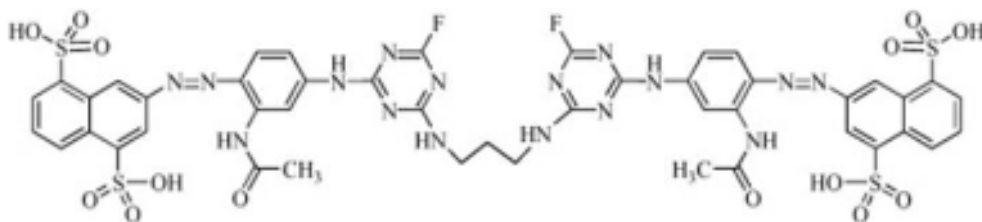


Rys. 5. Benzimidazol i ilustracja tworzenia wiązań wodorowych między dwoma cząsteczkami barwnika.

4. Dostępna w informacjach firmy Swiscolor i internecie charakterystyka użytych barwników.

- Cibacron Yellow LS-R** (C.I. Reactive Yellow 176) to dwureaktywny barwnik azowy marki Archroma (dawniej Huntsman), zawierający ugrupowania fluorotriazynowe, używany głównie do barwienia i drukowania włókien celulozowych. Charakteryzuje się bardzo wysokim stopniem reakcji z włóknem, co gwarantuje świetną powtarzalność odcieni

i zminimalizowanie zanieczyszczeń w ściekach. Oferuje bardzo dobre parametry wybarwień w zakresie prania, potu oraz działania światła. Badania przedstawione na stronie ScienceDirect.com wskazują na wysoki stopień odbarwiania ścieków przy zastosowaniu procesów fotokatalitycznych i jednocześnie przedstawiono tam poniższy wzór chemiczny tego barwnika. Kolejna nowa forma handlowa barwnika to Novacron Yellow LS-RN, który był o 25 % mniej wydajna kolorystycznie od obecnie polecanego Novacron Yellow LS-R-01.



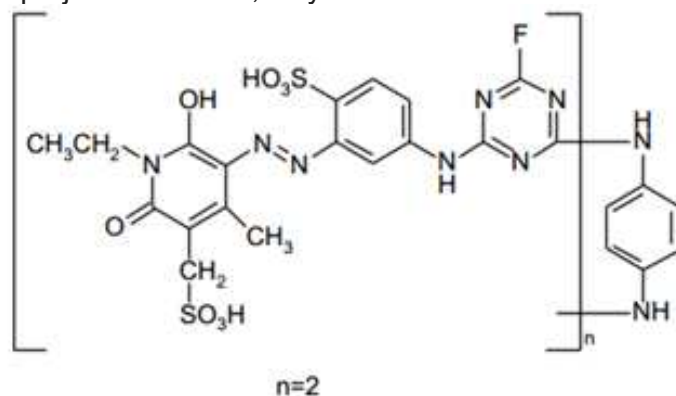
Rys. 6. Wzór chemiczny barwnika Cibacron Yellow LS-R [16]

- Cibacron Yellow LS-4G** (C.I. Reactive Yellow 207, CAS 335327-10-7.), często identyfikowany jako **Reactive Yellow TZ 4165** to barwnik diazowy, bi-reaktywny, zawierający fluorowane grupy triazynowe lub pirymidynowe, dający wybarwienia w kolorze żółtym z zielonym odcieniem. Powszechnie stosowany w zestawieniach tróchromatycznych do uzyskiwania barw zielonych oraz niebiesko-zielonych. Znany był również pod nazwą

Cibacron Brilliant Yellow H-4GN (Ciba), a obecnie polecany pod nazwą Novacron Yellow LS-4G. Stopień przereagowania wynosi powyżej 80%, co redukuje ilość barwnika i soli w ściekach. Kompatybilny z innymi barwnikami z gamy LS, co ułatwia uzyskiwanie szerokiej gamy odcieni. Według publicznego raportu identyfikacji tego barwnika zleconego przez producenta, jest to barwnik azowy zawierający jako układ reaktywny trójazynę z atomem

fluoru. Tu podano inny nr CAS 178198-11-3, sprzedawany przez producenta pod nazwą Cibacron Yellow LS-4G. Charakteryzuje się bardzo dobrą odpornością na pranie, pot, światło oraz działanie czynników mechanicznych. Ze względu na dużą cząsteczkę i złożoność chemiczną, barwniki z tej rodziny są trudne do biodegradacji w ściekach (wymagają zaawansowanych procesów utleniania). Budowa cząsteczki została zaprojektowana tak, aby

była płaską i liniową, co zwiększa powinowactwo barwnika do włókna, przypominając pod tym względem barwniki bezpośrednie. W przeciwieństwie do niektórych innych żółtych barwników reaktywnych, Novacron Yellow LS-4G jest odporny na zjawisko fotochromizmu (przejściowej zmiany barwy pod wpływem światła). Masa cząsteczkowa około 728,03 g/mol.



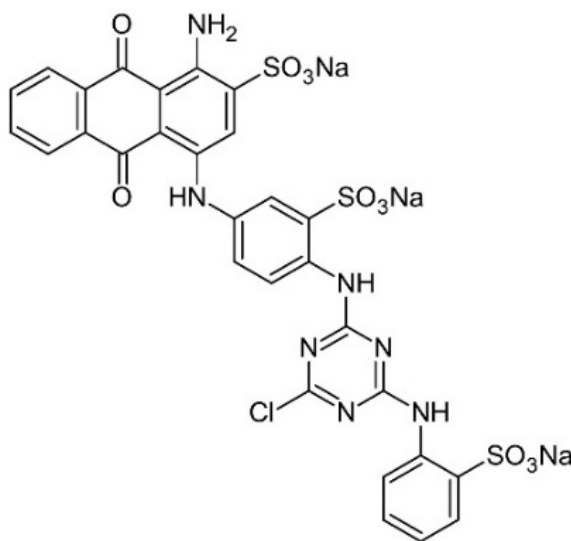
Rys. 7. Wzór chemiczny barwnika Cibacron Yellow LS-4G

- Cibacron Orange LS-BR** (CI Reactive Orange 132) to handlowa nazwa wysoce wydajnego, reaktywnego barwnika dla włókiennictwa (produkowanego m.in. przez firmę Huntsman). Jest on oparty na układzie z fluorotriazyną. Dokładny wzór chemiczny tego barwnika nie jest publicznie dostępny ze względu na zastrzeżony charakter receptur producenta. Cibacron Orange LS-BR opiera się jednak na strukturze **barwnika reaktywnego**, którego chromofor oznaczany jest w międzynarodowej klasyfikacji jako np. C.I. Reactive Orange 82, 5 lub pochodne). Opracowany z myślą o barwieniu z mniejszą ilością elektrolitów, co zmniejsza zasolenie ścieków i koszty procesu. Charakteryzuje się bardzo dobrą odpornością na światło, pranie i działanie potu. Używany jako jasny, pomarańczowy komponent w mieszankach trichromatycznych (np. w zestawieniu z Cibacron Blue LS-3R i Cibacron Red LS-B). Nie wykazuje tendencji do fotochromizmu i posiada bardzo dobrą zdolność migracji, co przekłada się na równomierne wybarwienie przędzy i tkanin.
- Cibacron Red LS-6G** jest barwnikiem reaktywnym należącym do czerwieni reaktywnych, których przedstawicielem jest CI Reactive Red 84. Jest barwnikiem azowym zawierającym dwa różne układy reaktywne chloro-s-triazyny i siarczanoetylosulfonylowy. Hydroliza barwnika przy pH 7 w kąpeli o temperaturze 50°C < 10% po 5 dniach [17]. Bardzo dobra rozpuszczalność w wodzie, co umożliwia przygotowanie stabilnych kąpeli barwiących. W kąpeli alkalicznej wykazuje doskonałe powinowactwo do włókna oraz dobrą trwałość wybarwień na pranie, pot i światło. Zapewnia intensywny, jasnoczerwony odcień z delikatną żółtawą poświatą.
- Cibacron Red LS-B, Novacron Red LS-B** (C.I. Reactive Red 227) to zaawansowany barwnik reaktywny firmy Huntsman. Zawiera azowy chromofor i więcej niż jedną grupę reaktywną monofluorotriazynową i siarczanoetylosulfonylową. Chromofor otrzymano z wykorzystaniem kwasu sulfononaftalenowego, uzyskując czyste czerwienie i szkarłaty.

Charakteryzuje się podwyższonym powinowactwem do włókien oraz bardzo dobrą rozpuszczalnością. Polecany do barwienia głównie włókien celulozowych. Zgodnie z informacją firmy Swisscolor obecnie polecany jest nowy produkt Novacron Red LS-BN, który jest o 25% silniejszy kolorystycznie.

- **Cibacron Brilliant Blue LS-G.** (C.I. Reactive Blue 19) to reaktywny barwnik antrachinonowy z reaktywną grupą chlorotrójazy. Jego chromofor opiera się na szkielecie antrachinonu z przyłączonymi grupami sulfonowymi oraz ugrupowaniem reaktywnym. Masa cząsteczkowa: ok. 774.2. Bardzo dobra rozpuszczalność w wodzie (tworzy klarowny, niebieski roztwór). Posiada wysoką odporność na degradację chemiczną i biologiczną. Stosowany do barwienia włókien celulozy i wełny metodą wyczerpywania. Obecnie polecany jest jako **Novacron Brilliant Blue LS-G** produkowany przez Huntsman, przeznaczony do barwienia i drukowania włókien celulozowych. Wyróżnia się wysoką reaktywnością, doskonałą trwałością oraz zdolnością do barwienia w niższych temperaturach. W tej wersji wskazywany jest jako barwnik dwureaktywny na bazie fluorotriazyny i winylosulfonu. Pozwala uzyskać bardzo wysokie odporności na czynniki mokre i światło na wyrobach celulozowych
- **Cibacron Blue LS-3R** (C.I. Reactive Blue 77) to anionowy barwnik antrachinonowy, powszechnie stosowany do barwienia włókien celulozowych, wełny i białek sojowych. Masa cząsteczkowa 774.16. Bardzo dobrze rozpuszczalny w wodzie, tworzy niebieski roztwór. Charakteryzuje się bardzo dobrą trwałością wybarwień na pranie. Jest szeroko wykorzystywany ze względu na niski stopień zasolenia kąpieli

barwiących (tzw. "low-salt") oraz wysoką powtarzalnością kolorów (odcienie od błękitu po granat).



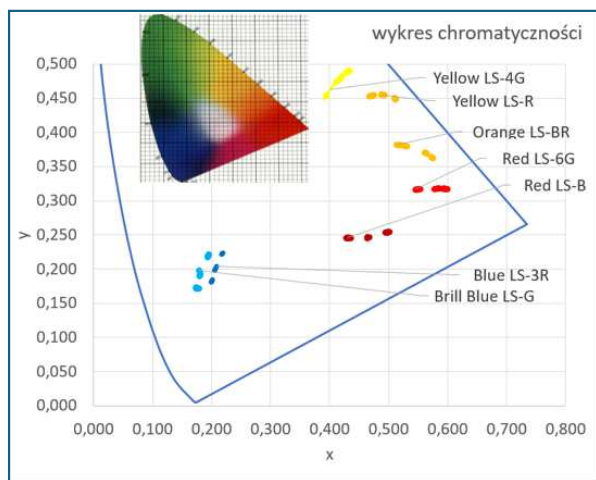
Rys. 8. Wzór chemiczny barwnika Cibacron Blue LS-3R

Jego następcą jest **Novacron Blue LS-3R** to innowacyjny, dwureaktywny barwnik należący obecnie do Archroma. Jako opatentowany produkt handlowy, nie posiada jednego, prostego wzoru sumarycznego jak proste związki nieorganiczne. Jego cząsteczka zawiera co najmniej dwie grupy reaktywne. Charakteryzuje się bardzo dobrym stopniem wyczerpania i utrwalenia na włóknie, dzięki czemu wymaga mniejszego zużycia soli i wody w procesie płukania w porównaniu do standardowych barwników. Bardzo wysoka odporność wybarwień na światło i pranie.

5. Uzyskane wyniki barwienia i dyskusja

5.1. Ocena barwy uzyskanych wybarwień

Charakterystykę kolorymetryczną uzyskanych wybarwień przedstawiono na wykresie chromatyczności barw x, y.



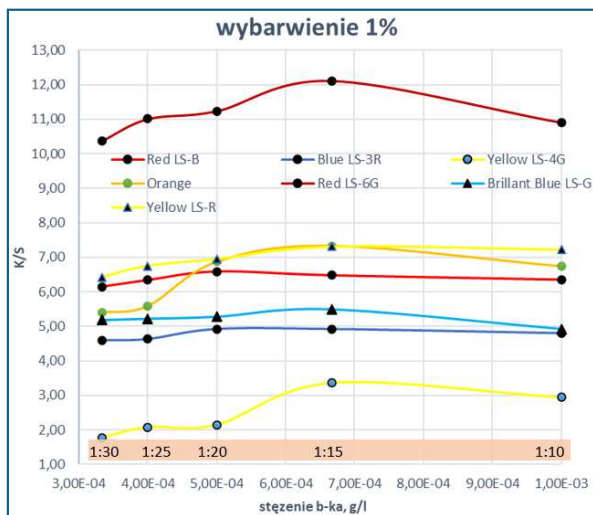
Rys. 9. Wykres chromatyczności x.y. uzyskanych wybarwień nici, siedmioma barwnikami reaktywnymi typu Cibacron LS.

Jak widać z przedstawionego wykresu wybarwienia wykonane stosowanymi barwnikami Cibacron LS charakteryzowane za pomocą współrzędnych barwy x, y, rozmieszczone są w pobliżu obrzeża „trójkąta barw” co świadczy, iż charakteryzują się one czystymi, żywymi kolorami. Na wykresie przedstawiono współrzędne wszystkich wykonanych wybarwień, a charakterystycznym jest, że wybarwienia o wyższej intensywności są bliżej krawędzi trójkąta na której teoretycznie znajdują się czyste barwy widmowe. Takie rozmieszczenie barwy dowodzi, że barwniki te mogą być stosowane jako trójka chromatyczna dając możliwość uzyskania szerokiej palety barw wypadkowych mieszczących się na wykresie wewnątrz trójkąta o wierzchołkach w punkcie barwników zastosowanych w mieszaninie. Taką cechą barwników Novacron LS, będącymi kolorystycznymi następcami zastosowanych w pracy barwników podkreśla również ich producent w dostępnym katalogu.

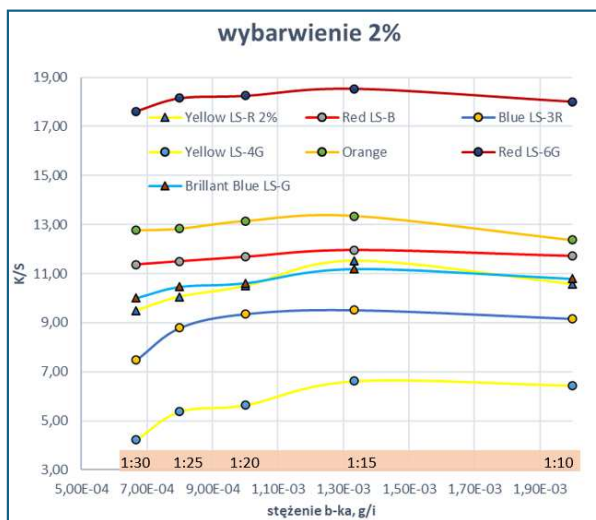
5.2. Ocena wpływu objętości kąpieli /modułu/ na intensywności wybarwienia.

Na podstawie pomiaru wartości K/S dla maksymalnej długości fali światła, dla każdego z barwników, wszystkich uzyskanych wybarwień merceryzowanych nici bawełnianych wykonano wykresy zmiany intensywności

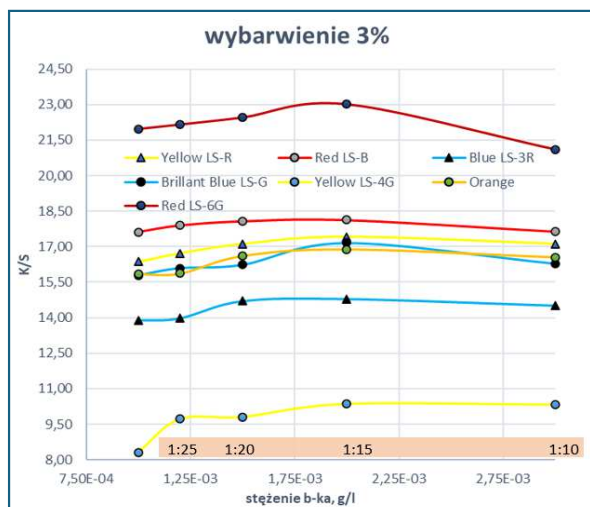
wybarwienia w zależności od użytego stężenia barwnika, a równocześnie stosowanej krotności kąpieli. Oczywistym jest, że wraz z zwiększaniem krotności kąpieli od 1:0 do 1:30 stężenie barwnika w kąpieli dla każdej z trzech intensywności wybarwień maleje.



Rys. 10. Wpływ krotności kąpieli na zmianę intensywności 1% owych wybarwień.



Rys. 11. Wpływ krotności kąpieli na zmianę intensywności 2% owych wybarwień.

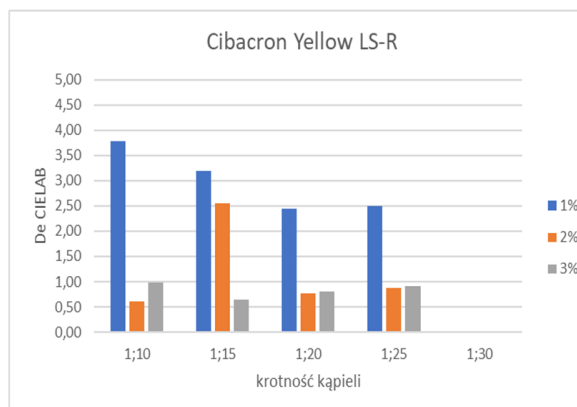
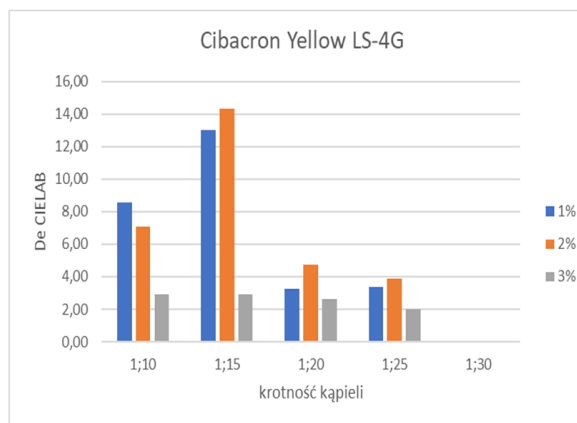


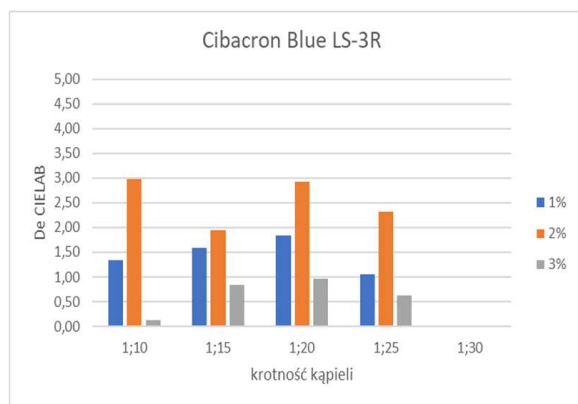
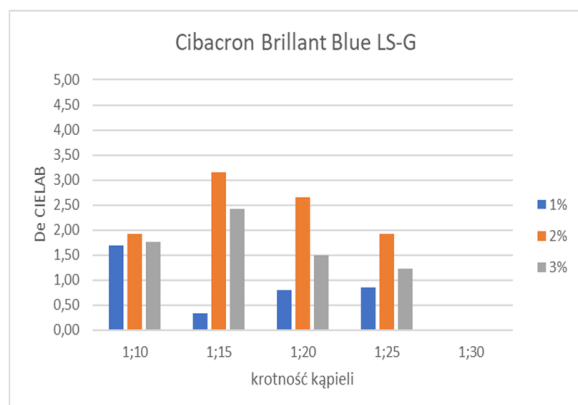
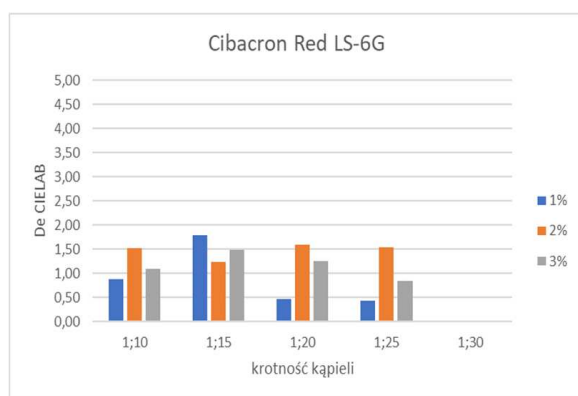
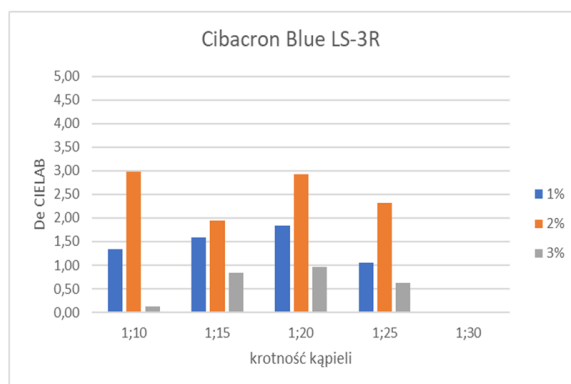
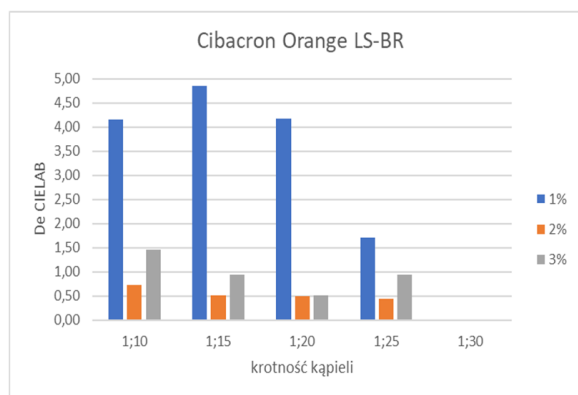
Rys. 12. Wpływ krotności kąpieli na zmianę intensywności 3% owych wybarwień.

Z przedstawionych na rys. 10-12. zależności widać, że większość zastosowanych barwników pozwala uzyskać na merceryzowanej bawełnianej wybarwienia o bardzo zbliżonych głębokościach barwy. Od tej reguły odbiegają dwa barwniki. Znacznie mniejszą wydajnością kolorystyczną od pozostałych charakteryzuje się Cibacron Yellow LS-4G ($\lambda=430\text{nm}$), jednocześnie dla tego barwnika obserwuje się największą wrażliwość na zmianę krotności kąpieli. Przy dużej krotności 1:30 intensywność wybarwienia charakteryzowana wartością K/S jest mniejsza w porównaniu z wybarwieniami wykonanymi przy mniejszych krotnościach kąpieli.

Również barwnik Cibacron Red LS-6G ($\lambda=510\text{nm}$) wyróżnia się od pozostałych stosowanych barwników relatywnie dużą wydajnością kolorystyczną we wszystkich trzech intensywnościach. Tu również widoczna jest większa jego wrażliwość na zmianę objętości kąpieli barwiącej. Zwykle przy zmniejszeniu objętości kąpieli intensywność wybarwienia powinna wzrastać, dla tej samej ilości barwnika w stosunku do włókna. W przypadku tych dwóch wymienionych barwników dla małej krotności kąpieli 1:10 intensywność wybarwienia wyrażona wartością K/S maleje. Może to wynikać z relatywnie większego błędu eksperymentu spowodowanego małą, niekorzystną w warunkach laboratoryjnych objętością kąpieli.

Wartości K/S dla wybarwień uzyskanych pozostałymi barwnikami zawierają się w stosunkowo wąskim przedziale, dla każdej z wykonanych intensywności i zgodnie z deklaracją producenta nie wykazują istotnej wrażliwości na zmianę krotności kąpieli w granicach od 1:10 do 1:30. Jest to ważna cecha barwnika, szczególnie z punktu widzenia laboratoryjnego opracowania recepty przy relatywnie dużych krotnościach i jej odtworzeniu w skali przemysłowej przy rzeczywiście stosowanych w aparatach małych krotnościach. Celem lepszego zobrazowania różnic w intensywności wybarwień uzyskanych przy różnej krotności kąpieli obliczono całkowitą różnicę barwy między poszczególnymi wybarwieniami, przyjmując za wybarwienie standardowe to uzyskane przy krotności 1:30. Wynik przedstawiono na rys. 13





Rys. 13. Różnica barwy DE_{CIELab} między wybarwieniami wykonanymi przy różnych krotnościach kąpieli.

W celu zdefiniowania standardowej procedury stosowanej podczas pomiaru barwy na spektrofotometrze opracowano normę międzynarodową ISO i zgodną z nią normę europejską, przyjętą przez wszystkie kraje członkowskie do **nieobligatoryjnego** stosowania PN EN ISO 105-J01 Tekstyli. Badanie odporności wybarwień. Ogólne zasady pomiaru barwy powierzchni.

Znormalizowany zapis równań do obliczenia składowych tróchromatycznych X , Y , Z dla standardowego obserwatora kolorymetrycznego CIE 1931 o kącie 2° i dodatkowego obserwatora kolorymetrycznego CIE 1964 o kącie 10° przedstawiono poniżej.

$$X = k \sum_{\lambda} R_{\lambda} S_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \Delta\lambda, \quad Y = k \sum_{\lambda} R_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda, \\ Z = k \sum_{\lambda} R_{\lambda} S_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \Delta\lambda$$

W równaniach, zgodnie z przyjętym przez CIE zapisem:

R_{λ} - oznacza wartość remisji dla oznaczonej długości fali światła i jest to jedyna wartość mierzona spektrofotometrem,

S_{λ} - oznacza względną wartość energii rozkładu standardowego iluminantu kolorymetrycznego lub iluminantu kolorymetrycznego CIE, dla którego wyznaczane są składowe tróchromatyczne. Najczęściej do obliczenia współrzędnych barwy wykorzystuje się **standardowy iluminant** CIE D_{65} , iluminant CIE A i inne znormalizowane iluminanty CIE symulujące oświetlenie z jakim w przybliżeniu możemy mieć do czynienia przy wizualnej ocenie barwy,

$\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ - oznaczają widmowe wartości charakteryzujące standardowego obserwatora kolorymetrycznego, [colour matching functions] zapisywane bez indeksu dla obserwatora standardowego z 1931 r. o kącie 2° , wykorzystanego w wykonanych w tej pracy obliczeniach i z indeksem 10 dla standardowego obserwatora dodatkowego z 1964 r. o kącie 10° .

k - jest współczynnikiem normalizującym i wyznaczany jest przyjmując, że składowa tróchromatyczna Y dla powierzchni całkowicie odbijającej światło (o emisji = 1 [100%]) dla całego zakresu długości fali świetlnej jest stała i wynosi 100.

$$k = 100 / \sum_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta\lambda$$

Stała k wyznaczana jest odpowiednio dla obserwatora o kącie 2° i zapisywana jak wyżej oraz dla obserwatora dodatkowego o kącie 10° i zapisywana z indeksem 10.

Składowe tróchromatyczne są podstawowymi wartościami do obliczenia współrzędnych L^* , a^* , b^* barwy zgodnie z procedurą zapisaną w powyższej normie. Wartość różnicy barwy wskazana na rys. 13. obliczona była z równania.

$$\Delta E_{CIEL^*a^*b^*} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

W świetle powyższych uwag dotyczących zmiany wartości K/S przy zmianie krotności kąpieli, największe różnice między wybarwieniami uzyskano dla barwnika Cibacron Yellow LS-4G. Dla wybarwień o intensywności 1% i 2 % różnica $DE_{CIEL^*a^*b^*}$ między wybarwieniami uzyskanymi przy krotności 1:10 i 1:15 osiąga wartości w przedziale 8 do 14 jednostek w porównaniu do wybarwień uzyskanych przy krotności 1:30. Znacznie mniejsze różnice DE uzyskano dla wybarwienia

3%-owego. To jedyny spośród analizowanych barwnik o tak dużej wrażliwości na zmianę objętości kąpieli. W przypadku wszystkich pozostałych barwników różnice nie przekraczają wartości DE 5 i największe są dla wybarwień 1%-owych i nieco mniejsze dla wybarwień 2%-owych. Generalnie im wyższa intensywność wybarwienia tym mniejsza różnica barwy między wybarwieniami uzyskanymi w kąpielach o różnej objętości.

Dla wyjaśnienia co w praktyce obserwatora wybarwień oznaczają przytoczone wyżej wartości różnicy barwy $DE_{CIEL^*a^*b^*}$, poniżej przytoczono zapisy w normach dotyczące szarej skali do oceny zmiany barwy i instrumentalnie wyznaczanej różnicy barwy.

Zgodnie z zapisem w pkt. 2.1 normy **PN EN ISO 105 A02 - Badania odporności wybarwień. Szara skala do oceny zmiany barwy** - stosowana do oceny zmiany barwy szara skala „ilustruje wzrastające kontrasty lub dostrzegalne różnice barwy, określone kolorymetrycznie” opisane w skali pięciostopniowej odpowiednio od 5 – brak różnicy, do 1- relatywnie duża różnica barwy.

Mimo dość zaawansowanego obecnie stosowania techniki spektrofotometrycznej do oceny współrzędnych barwy, bardziej praktycznym i zrozumiałym dla większości użytkowników odzieży jest ocena z wykorzystaniem szarej skali. Dla jednoznacznego opisu kontrastów dla poszczególnych stopni szarej skali określono je wykorzystując wskaźnik całkowitej różnicy barwy $DE_{CIEL^*a^*b^*}$. Zgodnie z powyższą normą różnica barwy, mierzona kolorymetrycznie, między poszczególnymi elementami każdej pary szarej skali wynosi:

Stopień odporności	różnica barwy $DE_{CIEL^*a^*b^*}$	Tolerancja
5	0	0,2
4-5	0,8	$\pm 0,2$
4	1,7	$\pm 0,3$
3-4	2,5	$\pm 0,35$
3	3,4	$\pm 0,4$
2-3	4,8	$\pm 0,5$
2	6,8	$\pm 0,6$
1-2	9,6	$\pm 0,7$
1	13,6	$\pm 1,0$

W normie **PN-EN ISO 105-A05 Badania odporności wybarwień – Instrumentalna ocena zmiany barwy i jej wyrażenie w stopniach szarej skali** - podano instrumentalną, z wykorzystaniem spektrofotometru, metodę wyznaczania zmiany barwy próbki po praniu. Metoda jest alternatywną do metody

organoleptycznej z wykorzystaniem szarej skali do porównania powstałych różnic barwy

po procesie np. prania, ale ocena wyrażana jest również w stopniach szarej skali. Istnieje zdefiniowana zależność między oceną zmiany barwy w stopniach szarej skali i parametrem kolorymetrycznym jakim jest całkowita różnica barwy $\Delta E_{CIEL^*a^*b^*}$.

Wykorzystując opisaną w powyższych dokumentach normalizacyjnych wiedzę można **w przybliżeniu** określić, podany poniżej, zakres zmiany całkowitej różnicy barwy przypisany do odpowiedniego stopnia szarej skali.

zakres całkowitej różnicy barwy $\Delta E_{CIEL^*a^*b^*}$			
1	powyżej	11,6	
1-2	w przedziale	8,2 -	11,6
2	w przedziale	5,8 -	8,2
2-3	w przedziale	4,1 -	5,8
3	w przedziale	2,95-	4,1
3-4	w przedziale	2,1 -	2,95
4	w przedziale	1,25-	2,1
4-5	w przedziale	0,4 -	1,25
5	poniżej	0,4	

Równanie to nie uwzględnia niedoskonałości przyjętej powszechnie przestrzeni trójwymiarowej L^* , a^* , b^* opisującej barwy a percepcją postrzegania barwy przez człowieka. Ponieważ zagadnienie dotyczy „szarej skali” to jest to szczególny przypadek takiej barwy, i nie definiuje różnicy w zakresie innych barw. różnica barwy w praktyce przemysłowej.

W dużych partiach produkcyjnych nie dąży się do $\Delta E = 0$, bo jest to praktycznie nierealne i nieekonomiczne (zmiennosc barwników, surowców, wilgotności, warunków barwienia). W wyrobach włókienniczych typowe granice-tolerancji obliczane z ogólnego, podanego wyżej wzoru $\Delta E_{CIEL^*a^*b^*}$ to:

- $\Delta E \leq 1,0-1,5 \rightarrow$ kolor uważany za praktycznie identyczny (dla odzieży premium, tapicerki, luksusowych marek).
- $\Delta E \leq 2,0-3,0 \rightarrow$ różnica słabo zauważalna, często akceptowana w produkcji masowej (odzież codzienna, konfekcja). Dotyczy to większości barw z wyjątkiem granatów.
- $\Delta E > 3,0-5,0 \rightarrow$ różnica zauważalna gołym okiem w bezpośrednim zestawieniu porównywanych wybarwień (najczęściej odrzut lub II gatunek).
- $\Delta E > 5,0 \rightarrow$ kolor wyraźnie inny, nieakceptowalny w większości zastosowań.

Literatura

1. <https://www.wiadomoscihandlowe.pl/>.
2. Czajkowski W. XXXII Seminarium Polskich Kolorystów, Zakopane – Kościelisko, 2016.
3. Budzisz T. Barwnikarstwo w Polsce. Fundacja Rozwoju Polskiej Kolorystyki, Łódź 2006.
4. Johann Rudolf Geigy-Merian - Wikipedia.
5. Dyes And Pigments Market (2026 - 2033). Market Reports, News & Insights, **Global Textile Dyestuff Market: Demand, Production, and Key Statistics (2024–2030)**, Published on March 9, 2026.
6. Nemec M., XXIV Kongres IFATCC, Pardubice 2016.
7. Christe R., M., Environmental aspect of textile dyeing, Woodhead Publishing Ltd. 2007.
8. Cervantes F., Santos A., *Colour removal of dyes from synthetic and Real textile wastewater in one- and two- stage anaerobic systems*, Bioresource Technology **101(20)** 2010; 7773-7779.
9. Schramm W., Jantschgi J., *Comparative assessment of textile dyeing Technologies from a preventive environmental protection point of view*, Color. Technology **115**(4) 130-135.
10. Khatri A., Peerzada M., H., Mohsin M., White M., *A review on developments in dyeing cotton fabrics with reactive dyes for reducing effluent pollution*, Journal of Cleaner Production **87** (2015) 50-57.
11. Blus K., *Barwniki reaktywne do włókien celulozowych*, XXX Seminarium Polskich Kolorystów „Osiągnięcia wykończalnictwa i jego przyszłość”, Zakopane 2014 i Blus K. *Barwniki reaktywne stosowane do barwienia włókien celulozowych metodami wyciągowymi*, Informator Chemika Kolorysty, Nr 36, 2020.
12. Taylor J., A., *Recent developments in reactive dyes*, Rev. Prog. Color. **30** 93-107.
13. Pogoda M., *AVITERA SE i ERIOPON LT – rewolucja w barwieniu włókien celulozowych barwnikami reaktywnymi*, XXVII Seminarium Polskich Kolorystów, Ustroń- Jaszowiec, 2011.
14. Duńska E., *Przyspieszony proces barwienia barwnikami reaktywnymi w kąpielach o niskich krotnościach*, XXVII Seminarium Polskich Kolorystów, Ustroń- Jaszowiec, 2011.
15. Szadowski J. *Rozwój w dziedzinie barwników*. XV Seminarium PKKol Mikołajki 1999 r./
16. Kositz M., Poullos I., Samara K., Tsatsaroni E., Darakas E. *Photocatalytic oxidation of Cibacron Yellow LS-R*, **Journal of Hazardous Materials** Volume 146, Issue 3, 31 July 2007, Pages 680-685
17. Martin Ferus-Comelo, *An analysis of the substantivity of hydrolysed reactive dyes and its implication for rinsing processes*, **Coloration Technology** November 2012.
18. Król D. Praca dyplomowa, *Wpływ krotności kąpieli na efekt barwienia nici bawełnianych barwnikami reaktywnymi*, Politechnika Łódzka, Łódź 2001.

Nowoczesne podejścia do bielenia materiałów celulozowych – w kierunku technologii przyjaznych środowisku

M. Bilińska¹, L. Bilińska¹

¹ Zakład Włókienniczy Biliński Sp.j., 95-050 Konstantynów Łódzki, ul. Mickiewicza 29

Streszczenie

W artykule przedstawiono kompleksowy przegląd metod bielenia materiałów celulozowych, analizując ewolucję od tradycyjnych kąpiei alkalicznych po bezściekowe technologie gazowe i niskotemperaturowe systemy komercyjne. Skoncentrowano się na rozwiązaniach minimalizujących zużycie wody i energii oraz ograniczających toksyczność ścieków przemysłowych. Szczególną uwagę poświęcono innowacyjnym procesom wykorzystującym waporyzowany nadtlenek wodoru (VHP) oraz ozon, które pozwalają na jednoczesne bielenie i dezynfekcję wyrobów celulozowych.

Abstract

This paper presents a comprehensive review of bleaching methods for cellulosic materials, analyzing the evolution of these technologies from traditional alkaline bleaching baths to waterless gas-phase processes and low-temperature commercial systems. The review focuses on solutions aimed at minimizing water and energy consumption while reducing the toxicity of industrial effluents. Particular attention is given to innovative bleaching technologies based on vaporized hydrogen peroxide (VHP) and ozone, which enable the simultaneous bleaching and disinfection of cellulosic products. The advantages, limitations, and application potential of the reviewed approaches are discussed in the context of sustainable textile processing and the growing demand for environmentally friendly manufacturing technologies. The presented analysis highlights current trends in the development of bleaching processes and identifies promising directions for future research and industrial implementation.

1. Wprowadzenie

Bawełna jest drugim najczęściej stosowanym włóknem w przemyśle tekstylnym, z globalną produkcją sięgającą 26,2 mln ton i udziałem w rynku na poziomie 24,4% [1]. Bielenie materiałów celulozowych stanowi jeden z kluczowych etapów procesów przygotowawczych, bezpośrednio wpływający na jakość dalszej obróbki, w szczególności barwienia. Surowe włókno celulozowe pochodzenia naturalnego, obok głównego polimeru (83-90%), zawiera szereg naturalnych zanieczyszczeń odpowiedzialnych między innymi za jego żółtawe zabarwienie oraz hydrofobowość: woski (0,4-1,0%), ligniny (0,8%) oraz flawonoidy (0,5-8%). Dodatkowo obecne są w nim pektyny, białka, kwasy organiczne oraz sole metali [1,2].

Podstawowym celem procesu bielenia jest usunięcie części z tych substancji poprzez reakcje utleniania prowadzące do usunięcia naturalnych pigmentów (np. flawonoidów, ligniny, wosków) poprzez zmiany układu elektronów w chromoforach tych związków i przekształcenia ich w bezbarwne, łatwo usuwalne produkty. Oprócz uzyskania wysokiego stopnia bieli, kluczowym efektem jest poprawa hydrofilowości materiału, co warunkuje równomierność i efektywność późniejszego procesu barwienia [1,3,4].

W praktyce przemysłowej bielenie należy do najbardziej wymagających etapów obróbki tekstyliów pod względem zużycia zasobów. Tradycyjne metody mokre wymagają średnio 100-150 dm³ wody oraz od 5 do 20 kWh energii na 1 kg wyrobu włókienniczego [5]. Jednocześnie konieczne jest zachowanie precyzyjnej równowagi pomiędzy skutecznością usuwania zanieczyszczeń a ochroną struktury włókna, aby uniknąć jego chemicznej degradacji [6].

W ostatnich latach, co znajduje odzwierciedlenie również w strategii Zakładu Włókienniczego Biliński, obserwuje się wyraźny trend odchodzenia od intensywnych warunków procesu. Kierunek zmian wyznacza optymalizacja poprzez obniżenie temperatury, ograniczanie ilości chemikaliów oraz wdrażanie innowacyjnych technologii „suchych” (prowadzonych w fazie gazowej), które pozwalają na znaczną redukcję zużycia wody i energii przy zachowaniu stabilnych parametrów jakościowych.

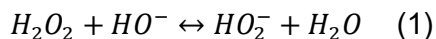
2. Konwencjonalne bielenie – rozwiązanie sprawdzone, ale obciążające

Najwcześniejsze metody bielenia materiałów celulozowych stosowane były już od średniowiecza i opierały się na wielokrotnym praniu oraz długotrwałej ekspozycji tkanin na działanie promieniowania słonecznego, tlenu atmosferycznego i wilgoci. Proces ten, znany jako bielenie na trawie (grass bleaching), mógł trwać od kilku tygodni do nawet kilku miesięcy. Przełom nastąpił pod koniec XVIII wieku, kiedy Claude Louis Berthollet wprowadził do bielenia związki chloru, umożliwiając znaczące skrócenie czasu procesu. W XIX wieku rozpowszechniło się stosowanie podchlorynu wapnia i podchlorynu sodu, które przez wiele dekad stanowiły podstawowe środki bielące w przemyśle włókienniczym. W latach 40. i 50. XX wieku coraz większe znaczenie zyskał chloryn sodu (NaClO_2), generujący w środowisku kwaśnym dwutlenek chloru (ClO_2), charakteryzujący się wysoką skutecznością wobec naturalnych pigmentów włókien celulozowych. Od lat 60.–70. XX wieku dominującą technologią stało się alkaliczne bielenie nadtlenkiem wodoru (H_2O_2)

Bielenie nadtlenkiem wodoru (H_2O_2) w środowisku alkalicznym nadal pozostaje standardem w przemyśle wykończalniczym ze względu na jego wysoką skuteczność w uzyskiwaniu wysokiego stopnia bieli [2,7]. Proces ten jest wysoce zależny od precyzyjnej kontroli warunków reakcji, takich jak stężenie reagentów, temperatura i pH kąpieli.

W środowisku alkalicznym nadtlenek wodoru ulega częściowej dysocjacji, prowadząc do powstania anionu nadtlenkowego

(HO_2^-), który jest uznawany za główny czynnik odpowiedzialny za efekt bielący [7]. Reakcja ta przebiega zgodnie z równaniem 1:



Anion ten wchodzi w reakcje ze związkami chromoforowymi obecnymi w strukturze zanieczyszczeń, powodując ich utlenienie i przekształcenie w formy bezbarwne, rozpuszczalne w wodzie [7].

Kluczowym problemem w klasycznym bieleniu jest jednoczesny, nieproduktywny rozkład nadtlenku wodoru do tlenu cząsteczkowego i wody. Proces ten jest katalizowany przez obecność śladowych ilości jonów metali przejściowych (takich jak żelazo, miedź czy mangan), które naturalnie występują we włóknach celulozowych lub w wodzie procesowej [7]. Prowadzi to do:

- *Strat utleniacza*: Obniżenie efektywności bielenia i konieczności stosowania nadmiaru reagentów,
- *Degradacji celulozy*: Niekontrolowany rozkład nadtlenku generuje rodniki, które atakują łańcuchy polimerowe celulozy, co skutkuje spadkiem stopnia polimeryzacji (DP) oraz pogorszeniem właściwości mechanicznych włókna.

Aby ograniczyć te zjawiska, w praktyce przemysłowej konieczne jest stosowanie dodatków stabilizujących oraz prowadzenie procesu w wysokich temperaturach (powyżej 90°C), co pozwala na uzyskanie odpowiednio wysokiego stopnia (WI ok. 80) bieli w akceptowalnym czasie [5].

Stosowanie silnie alkalicznego środowiska (pH często przekraczające 11) i wysokiej temperatury determinuje główne wady nadtlenkowej metody bielenia:

- *Wysokie zużycie zasobów*: Przeciętne zużycie wody wynosi $100\text{--}150 \text{ dm}^3$, a energii $5\text{--}20 \text{ kWh}$ na 1 kg wyrobu [5],
- *Intensywne płukanie*: Konieczność całkowitego usunięcia alkaliów i pozostałości nadtlenku z materiału przed kolejnymi etapami wymaga ogromnych ilości wody,
- *Obciążenie ścieków*: Generowane odpady charakteryzują się wysokim ładunkiem

chemicznym (BZT, ChZT) oraz wysokim pH, co wymusza kosztowne procesy neutralizacji i oczyszczania [4].

W warunkach przemysłowych istotną trudność stanowi również zmienność jakości surowca celulozowego. Wymusza to stosowanie tzw. „bezpiecznych marginesów” technologicznych – utrzymywania bardziej intensywnych warunków bielenia, niż wynikałoby to z optymalnych założeń laboratoryjnych, co dodatkowo zwiększa koszty i ryzyko uszkodzeń włókien [4].

Powyższe ograniczenia stanowią bezpośredni impuls do poszukiwania alternatywnych technologii, takich jak systemy niskotemperaturowe czy procesy w fazie gazowej, które pozwalają na prowadzenie bielenia w łagodniejszych warunkach przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia zasobów.

3. *Ekologiczne alternatywy w fazie ciekłej i procesy niskotemperaturowe*

W odpowiedzi na ograniczenia klasycznego bielenia nadtlenkowego, rozwój technologii skupił się na poszukiwaniu utleniaczy o wyższym potencjale utleniająco-redukcyjnym, które są skuteczne w niższych temperaturach i szerszym zakresie pH. [3,8,2,6,9,7].

3.1. *Kwas nadooctowy (PAA)*

Kwas nadooctowy (CH_3COOOH) zyskuje na znaczeniu jako wysoce ekologiczny czynnik bielący dla materiałów celulozowych. Jego główną zaletą jest zdolność do skutecznego usuwania zanieczyszczeń bielenia w temperaturach rzędu 50-60°C oraz w środowisku o pH zbliżonym do neutralnego lub lekko kwasowego (pH 6-8) [8].

- *Mechanizm:* PAA generuje tlen *in statu nascendi*, który selektywnie utlenia chromofory zanieczyszczeń barwnych włókna bez drastycznego ataku na łańcuchy celulozy,
- *Zalety ekologiczne:* Produktami rozkładu kwasu nadooctowego są jedynie tlen, woda i kwas octowy, co czyni go całkowicie biodegradowalnym,

- *Właściwości włókien:* Zastosowanie PAA pozwala na zachowanie wyższego stopnia polimeryzacji (DP) włókien w porównaniu do bielenia alkalicznego H_2O_2 .

3.2. *Systemy enzymatyczne (Bioscouring i Biobleaching)*

Wykorzystanie enzymów, takich jak pektynazy, celulazy czy lakazy, pozwala na selektywne usuwanie zanieczyszczeń nie celulozowych (pektyn, wosków) w stosunkowo łagodnych warunkach (pH 5-7, temp. 50-60°C) [2,6,9].

- *Synergia:* Często stosuje się procesy hybrydowe, gdzie bioscouring (oczyszczanie enzymatyczne) poprzedza bielenie chemiczne, co pozwala na skrócenie czasu trwania tego drugiego i redukcję stężenia utleniaczy.
- *Efekt:* Materiały celulozowe poddane obróbce enzymatycznej charakteryzują się wyjątkową miękkością i mniejszą utratą masy w porównaniu do procesów chemicznych.

3.3. *Wykorzystanie aktywatorów i katalizatorów*

W tradycyjnym bieleniu nadtlenkowym coraz częściej stosuje się aktywatory typu TAED (tetraacetylenodiamina) lub katalizatory metaloorganiczne (np. na bazie manganu), które pozwalają na obniżenie temperatury procesu do 60-70°C. Pozwala to na uniknięcie termicznej degradacji włókien i oszczędność energii przy wykorzystaniu istniejącego parku maszynowego [3,6,7,9].

4. *Innowacje w fazie gazowej i technologie wspomagające*

Coraz większe zainteresowanie w uszlachetnianiu materiałów celulozowych budzą procesy prowadzone w fazie gazowej, które stanowią odpowiedź na restrykcyjne wymogi środowiskowe. Wykorzystanie ozonu (O_3), waporyzowanego nadtlenu wodoru (VHP) oraz technologii plazmowych pozwala na odejście od klasycznych metod mokrych na rzecz rozwiązań o znacznie niższym śladzie wodnym i węglowym [1,5,10–13].

4.1. Bielenie ozonowe i ocena cyklu życia (LCA)

Bielenie ozonowe może być prowadzone zarówno w kąpeli wodnej, jak i w fazie gazowej. W rozwiązaniach gazowych materiał celulozowy poddawany jest działaniu ozonu w zamkniętej komorze, gdzie kluczowymi parametrami są stężenie gazu, wilgotność materiału oraz czas ekspozycji [10].

- *Efektywność i optymalizacja*: Najnowsze badania wskazują, że optymalne warunki bielenia ozonowego (stężenie ok. 40 g/m³, pH 5) pozwalają uzyskać stopień bieli porównywalny z metodami konwencjonalnymi, przy jednoczesnym zachowaniu akceptowalnej wytrzymałości włókien [10],
- *Ekologia (LCA)*: Analiza cyklu życia (Life Cycle Assessment) z 2026 roku potwierdza, że bielenie ozonowe jest metodą bardziej zrównoważoną niż tradycyjne procesy nadtlenkowe. Mimo wysokiego zużycia energii elektrycznej niezbędnej do generowania ozonu, metoda ta generuje o 80% mniejszy ślad wodny i znacząco niższy ślad węglowy w całym cyklu produkcyjnym [10].

4.2. Technologia VHP i synergetyczne bielenie gazowe

Kluczowy wkład w rozwój metod gazowych w Polsce ma Łukasiewicz – Łódzki Instytut Technologiczny. Opracowana tam technologia wykorzystująca waporyzowany nadtlenek wodoru (VHP) oraz jego synergię z ozonem stanowi przełom w bezściekowej obróbce materiałów celulozowych [1,5,13].

- *Parametry procesu*: Bielenie VHP prowadzone jest w temperaturze zaledwie 20-60°C przy stężeniu par rzędu 100-1500 ppm [1,5]. Precyzyjna kontrola wilgotności zapobiega skraplaniu czynnika na materiale, co chroni strukturę polimeru przed miejscową degradacją [5].
- *Dekontaminacja mikrobiologiczna*: Jest to unikalna cecha technologii ŁIT. Proces ten zapewnia nie tylko wysoki stopień bieli, ale i pełną aseptykę, eliminując bakterie

chorobotwórcze (*S. aureus*, *E. coli*) oraz formy przetrwalnikowe (*Bacillus subtilis*, *Bacillus atrophaeus*), co czyni taki wyrób idealnym dla sektora medycznego [1,5]

4.3. Technologie plazmowe i promieniowanie UV

Alternatywę dla procesów chemicznych stanowią technologie plazmowe, wykorzystujące zimną plazmę generowaną w atmosferze gazowej. Plazma zawiera wysokoenergetyczne cząstki (elektrony, jony, rodniki), które modyfikują powierzchnie materiałów celulozowych bez naruszenia ich wnętrza [11,12].

- *Synchronizacja procesów*: Zastosowanie plazmy atmosferycznej pozwala na jednoczesne prowadzenie procesów odklejania (desizing), oczyszczania (scouring) i wstępnego bielenia w temperaturze otoczenia. Skraca to czas obróbki mokrej i drastycznie zmniejsza zapotrzebowanie na agresywne środki o alkalicznym odczynie pH [11],
- *Hybrydyzacja (Plazma + UV)*: Nowoczesne podejście zakłada łączenie plazmy z promieniowaniem ultrafioletowym (UV-A). Takie zestawienie w procesach typu cold-batch pozwala na usuwanie naturalnych zanieczyszczeń zwiększając hydrofیلowość materiału przed kolejnymi etapami wykończalniczymi [12].

4.4. Wyzwania i ograniczenia metod „suchych”

Mimo licznych zalet, technologie gazowe i plazmowe wiążą się z wyzwaniami, które są obecnie przedmiotem intensywnych badań w działach R&D:

- *Degradacja polimeru*: Intensywne warunki utleniające mogą prowadzić do obniżenia stopnia polimeryzacji (DP) celulozy, co wymaga precyzyjnego sterowania czasem ekspozycji.
- *Równomierność działania*: W przypadku materiałów o większej gramaturze lub złożonej strukturze przestrzennej, zapewnienie jednnorodnej penetracji zarówno gazu jak i plazmy do wnętrza

struktury pozostaje trudnością technologiczną.

- *Aspekt ekonomiczny*: Wdrożenie tych metod w skali przemysłowej wymaga inwestycji w specjalistyczne komory procesowe i generatory, co musi być równoważone przez oszczędności w zużyciu wody i chemikaliów, aby proces obróbki był opłacalny.

Procesy w fazie gazowej, wspierane przez technologie plazmowe i UV, stanowią realną przyszłość zrównoważonego włóknictwa. Oferują one nie tylko oszczędność materiału, co jest szczególnie istotne w przypadku tekstyliów o przeznaczeniu medycznym i higienicznym.

5. Komercyjne systemy i optymalizacja procesów przemysłowych

Współczesny przemysł wykończalniaczy dąży do wdrażania kompletnych systemów technologicznych, które pozwalają na szybką adaptację procesów niskotemperaturowych przy wykorzystaniu istniejącego parku maszynowego. Rozwiązania te koncentrują się na eliminacji agresywnych alkaliów oraz optymalizacji kinetyki bielenia materiałów celulozowych [9,14,15].

5.1. Technologia Fibre52 (System PureWhite)

System Fibre52 (Innovo Fibre / Archroma) stanowi jedno z najnowocześniejszych podejść do zrównoważonego przygotowania materiałów celulozowych. W przeciwieństwie do metod konwencjonalnych, proces ten prowadzony jest w pH neutralnym (6.0-7.0) oraz obniżonej temperaturze do 75°C [9].

Kluczowe komponenty systemu to:

- *FIBRE52 QUEST*: Środek sekwestrujący, który wiąże jony metali przejściowych (Fe, Cu, Mn), zapobiegając katalitycznemu rozkładowi nadtlenu wodoru i powstawaniu uszkodzeń punktowych (pinholes) we włóknie [9],

- *FIBRE52 ASSIST*: Wielofunkcyjny preparat zwilżający i lubrykant, który zapewnia równomierną penetrację substratu oraz zapobiega powstawaniu zagnieceń w procesach okresowych (jet, winch) [9],
- *FIBRE52 BOOST*: Preparat enzymatyczny, który wspomaga usuwanie resztkowego nadtlenu wodoru w niższych temperaturach, co skraca czas płukania i przygotowuje materiał do barwienia [9].

Zastosowanie pełnego systemu pozwala na redukcję zużycia wody o 70% oraz energii o 40%, przy jednoczesnym zachowaniu o ok. 10-15% wyższej wytrzymałości mechanicznej włókien w porównaniu do bielenia alkalicznego [9].

Fibre52 należy do najbardziej interesujących komercyjnych technologii obróbki/bielenia wyrobów celulozowych opracowanych w ostatnich latach. Należy jednak podkreślić, że dostępność szczegółowych informacji technicznych dotyczących mechanizmu procesu jest ograniczona, ponieważ producent nie ujawnia pełnego składu stosowanych preparatów ani dokładnego przebiegu reakcji chemicznych. Dostępne materiały wskazują, że technologia opiera się na niskotemperaturowym procesie prowadzonym w warunkach neutralnego pH, bez stosowania sody kaustycznej, co stanowi istotne odejście od klasycznego alkalicznego bielenia nadtlakiem wodoru. Jednocześnie brak jednoznacznych danych pozwalających stwierdzić, że jest to całkowicie nowa klasa procesów utleniających. Dostępne informacje sugerują raczej wykorzystanie nadtlenu wodoru w połączeniu z opatentowanym układem aktywatorów lub katalizatorów umożliwiającymi skuteczne bielenie w łagodniejszych warunkach procesowych. Z tego względu Fibre52 można postrzegać jako nowoczesną ewolucję technologii nadtlakowych, a nie całkowite odejście od koncepcji bielenia oksydacyjnego opartego na H_2O_2 . Jej innowacyjność wynika przede wszystkim z obniżenia temperatury procesu, eliminacji środowiska silnie alkalicznego oraz ograniczenia zużycia wody i energii przy zachowaniu wymaganego odpowiednio wysokiego stopnia bieli.

5.2. System Happy Bleach (FTR S.r.l.)

Innowacja Happy Bleach opiera się na całkowitej eliminacji sody kaustycznej oraz nadtlenu wodoru z procesu bielenia materiału celulozowego [14].

- Uproszczenie procesu: System zastępuje złożone receptury jednym preparatem, co redukuje czas operacyjny i zużycie energii, ponieważ jak deklaruje producent proces odbywa się w kąpeli [14],
- Aspekt ekologiczny: Happy Bleach charakteryzuje się niską zawartością substancji powierzchniowo czynnych (poniżej 3%) i wysoką biodegradowalnością, co znacząco obniża wskaźniki BZT i ChZT w ściekach [14].

Technologia wyróżnia się wysokim stopniem uproszczenia procesu i potencjalnie mniejszym wpływem na degradację włókien. Jednocześnie brak powszechnie dostępnych informacji dotyczących składu preparatu oraz

mechanizmu bielenia utrudnia jednoznaczną ocenę jej innowacyjności i porównanie z innymi nowoczesnymi technologiami bielenia.

5.3. Technologia Cold White (Zschimmer & Schwarz)

Rozwiązanie to bazuje na zastosowaniu aktywatora Optavon LBT, który drastycznie obniża energię aktywacji reakcji utleniania. Pozwala to na skuteczne bielenie nadtlencowe w temperaturach 70-80°C. Dzięki temu materiały celulozowe zachowują naturalną miękkość i wyższą stabilność wymiarową, co jest szczególnie istotne w przypadku dzianin wrażliwych na odkształcenia termiczne [15].

6. Porównanie wybranych metod bielenia materiałów celulozowych

Poniższa tabela przedstawia zestawienie kluczowych parametrów operacyjnych i środowiskowych dla omawianych technologii.

Tabela 1. Porównanie wybranych metod bielenia materiałów celulozowych pod kątem parametrów procesowych i środowiskowych.

Metoda	Temp. [°C]	pH	Zużycie zasobów (Woda/Energia)	Zalety/Cechy unikalne	Odkośnik
H ₂ O ₂ (klasyczna)	95-110	>11.0	Wysokie (100-150 dm ³ /kg)	Wysoki stopień bieli, ryzyko spadku DP	[2,5,7]
Kwas nadociowy (PAA)	50-70	6.0-8.0	Średnie	Pełna biodegradowalność, łagodne dla włókna	[8]
FIBRE52 (PureWhite)	75	7.0	Niskie (-70% wody, 40% energii)	Neutralne pH, wyższa wytrzymałość, brak zmiękczacza	[9]
VHP + Ozon (ŁIT)	20-60	Brak (gaz)	Minimalne (beźściekowe)	Bielenie + Sterylizacja	[1,5]
Plazma + UV	25	brak	Minimalne	Modyfikacja „sucha”, wzrost hydrofilowości	[12]

7. Podsumowanie

Analiza dostępnej literatury oraz najnowszych wdrożeń przemysłowych wskazuje na nieuchronność transformacji procesów bielenia materiałów celulozowych w kierunku technologii „low-impact”.

- Metody gazowe (VHP/Ozon) oferuje najwyższy poziom oszczędności wody i dodatkową funkcjonalność w postaci dekontaminacji mikrobiologicznej, co czyni je kluczowymi dla sektora medycznego [1,5,10],
- Systemy niskotemperaturowe (Fibre52, Cold White) stanowią optymalne rozwiązanie dla klasycznej wykończalni, pozwalając na natychmiastową redukcję kosztów mediów bez inwestycji w nowe maszyny [9,15],
- Technologie hybrydowe (Plazma + UV), choć wciąż wymagają dopracowania w skali masowej, wskazują kierunek ku całkowicie „suchym” procesom przygotowawczym przyszłości [10,12].

Współczesne podejście do bielenia materiałów celulozowych odchodzi od intensyfikacji warunków procesowych na rzecz ich precyzyjnej optymalizacji. Rozwiązania komercyjne, takie jak Fibre52®, oraz innowacyjne technologie opracowane przez Łukasiewicz – Instytut Włókiennictwa dowodzą, że możliwe jest uzyskanie wysokich parametrów jakościowych przy znacznym ograniczeniu zużycia wody, energii oraz ilości stosowanych środków chemicznych. Należy jednak podkreślić, że alkaliczne bielenie nadtlakiem wodoru nadal pozostaje przemysłowym punktem odniesienia, a większość nowoczesnych technologii projektowana jest w taki sposób, aby osiągnąć stopień bieli porównywalny z uzyskiwanym w klasycznych procesach nadtlakowych przy jednoczesnym zmniejszeniu obciążenia środowiska. W konsekwencji przyszłość branży tekstylnej wydaje się należeć do technologii niskotemperaturowych i niskozasobowych, które skutecznie łączą efektywność ekonomiczną, wysoką jakość wyrobów oraz troskę o zasoby naturalne.

8. Literatura

1. Walawska, A., Olak-Kucharczyk, M., Kaczmarek, A. & Kudzin, M. H. Environmentally Friendly Bleaching Process of the Cellulose Fibres Materials Using Ozone and Hydrogen Peroxide in the Gas Phase. *Materials* **17**, 1355 (2024).
2. Mamun, M. A. A., Hasan, H. & Rahman, G. M. S. Green Eco-Friendly Treatment of Cotton Fabric: A Sustainable Alternative to Chemical Treatment.
3. Dursun, S. & Yildiz, S. Z. Eco-Friendly Bleaching of Cotton Fabrics Without Heating Using Direct Process Water in the Presence of Sodium Chlorite and Phosphonate. *Journal of Natural Fibers* **20**, 2146248 (2023).
4. Uğur, Ş. S., Karaboyacı, M. & Boguniewicz-Zablocka, J. Influence of Cotton Bleaching Methods on the Parameters of Generated Textile Industrial Wastewater. *Sustainability* **15**, 15592 (2023).
5. Walewska, A. *et al.* Bezściekowy i niskotemperaturowy sposób bielenia z jednoczesną dezynfekcją wyrobów celulozowych. (2016).
6. Hashem, A. & Farag, S. Cotton bleaching: evolution, current practices, and future perspectives. *Int J Adv Manuf Technol* <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16185-4> (2025) doi:10.1007/s00170-025-16185-4.
7. Brooks, R. E. & Moore, S. B. Alkaline hydrogen peroxide bleaching of cellulose.
8. Mayta, S., Huamani-Palomino, R. G., Córdova, B. M., Rivera, E. & Quintana, M. Utilizing peracetic acid as an eco-friendly bleaching agent: investigating whiteness levels of cellulose microfibers from corn husk waste. *Biomass Conv. Bioref.* **15**, 24571–24583 (2025).
9. FIBRE52. <https://www.fibre52.com>.
10. Abdelileh, M., Souissi, M., Said, H. B. &

Dhaouadi, H. Ecological bleaching process using ozone as alternative to hydrogen peroxide: A comparative life cycle assessment. *Journal of Hazardous Materials Advances* **22**, 101105 (2026).

11. Samei, N., Shahidi, S. & Mongkholrattanasit, R. Dry Finishing Using Plasma Treatment for Shortening the Initial Wet Finishing of Cotton Fabrics. *Fibers Polym* **23**, 3442–3451 (2022).

12. Li, Q., Xiao, X., Jiang, H. & Zhou, Y. Assembling plasma and ultraviolet radiation with cold-batch process towards a water and energy conservative cotton bleaching technology. *Sustainable Materials and Technologies* **46**, e01644 (2025).

13. Walawska, A., Sójka-Ledakowicz, J., Olczyk, J. & Kiwała, M. Zastosowanie nadtlenu wodoru w fazie gazowej do dekontaminacji materiałów włókienniczych. **9**, 14–16 (2017).

14. Galvani, V. & Alessandro, A. S. Happy Bleach. <https://www.ftr.it/en>

15. Mehlhorn, A., Mobius, S., Knoblauch, A. & Peukert, M. COLD WHITE - the sustainable bleaching technology of ZSCHIMMER & SCHWARZ. *TextileToday Bangladesh* <https://www.textiletoday.com.bd/cold-white-sustainable-bleaching-technology-zschimmer-schwarz> (2019).

Charakterystyka przemysłu włókienniczego i jego wpływu na stan środowiska oraz zasoby wodne

*Anetta Walawska¹, Magdalena Olak-Kucharczyk¹, Joanna Olczyk¹,
Iwona Kucińska – Król¹, Martyna Gloc^{1,2}, Renata Żyła¹*

¹Sieć Badawcza Łukasiewicz – Łódzki Instytut Technologiczny, Centrum Gospodarki o Obiegu Zamkniętym, ul. Brzezińska 5/15, 92-103, Łódź, Polska.

²Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Katedra Inżynierii Bioprocessowej, ul. Wólczańska 213, 93-005, Łódź, Polska.

Wstęp

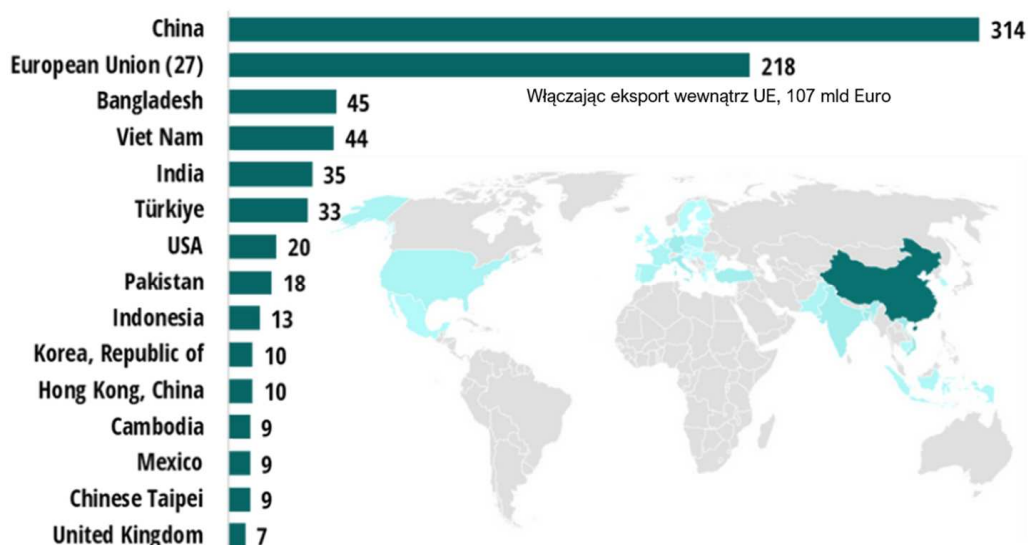
Tales z Miletu powiedział: „Początkiem wszechrzeczy jest woda”. Woda jest niezbędna do życia i prowadzenia niemal każdej działalności gospodarczej. Postępujący rozwój cywilizacyjny przyczynia się do wzrostu zapotrzebowania na wodę, której zasoby są często nadmiernie i nieracjonalnie eksploatowane. Przemysł włókienniczy stanowi jeden z kluczowych sektorów nowoczesnej gospodarki globalnej. Obejmuje on produkcję włókien, przędz, tkanin oraz gotowych wyrobów tekstylnych, a jego wartość rynkowa szacowana jest na około 1,5 biliona dolarów rocznie. Branża ta ma jednocześnie ogromny wpływ na środowisko naturalne, w tym na zasoby wodne, jako że procesy produkcyjne charakteryzują się wysokim zużyciem wody oraz generują znaczną ilość zanieczyszczeń.

Charakterystyka przemysłu włókienniczego na świecie

Analiza danych (rys. 1) wskazuje na wyraźną koncentrację światowego eksportu odzieży i tekstyliów w ograniczonej liczbie gospodarek. Niekwestionowanym liderem pozostają Chiny, których wartość eksportu w roku 2023 osiągnęła 314 mld EUR, co stanowi poziom znacząco przewyższający wyniki pozostałych eksporterów. Pozycja Chin odzwierciedla utrzymującą się dominację tego kraju w globalnych łańcuchach wartości sektora tekstylnego-odzieżowego, wynikającą z

wysokich zdolności produkcyjnych, rozwiniętej infrastruktury przemysłowej oraz kompleksowego zaplecza dostawców [1].

Drugą pozycję zajmuje Unia Europejska (UE-27) z eksportem o wartości 218 mld EUR, przy czym wartość ta obejmuje również handel wewnątrzunijny, szacowany na 107 mld EUR. Potwierdza to istotną rolę Europy w światowym przemyśle mody i tekstyliów, szczególnie w segmentach produktów o wyższej wartości dodanej, specjalistycznych wyrobów tekstylnych oraz produktów premium. Uznaje się, że Europejska odzież to najatrakcyjniejsza kategoria produktów dla klientów na całym świecie. Co więcej Europa jest światowym liderem badań i innowacji w obszarze tekstyliów. Ponadto w Europie odnotowuje się istotne zwiększenie produkcji tekstyliów technicznych [1]. Kolejną grupę stanowią państwa azjatyckie pełniące funkcję kluczowych ośrodków produkcyjnych dla światowych marek odzieżowych. Bangladesz osiągnął eksport na poziomie 45 mld EUR, wyprzedzając nieznacznie Wietnam (44 mld EUR). Oba kraje odgrywają strategiczną rolę w globalnym modelu produkcji odzieży, opartym na relatywnie niskich kosztach pracy i silnej integracji z międzynarodowymi łańcuchami dostaw. Kolejne miejsca zajmują Indie (35 mld EUR) oraz Turcja (33 mld EUR), które dysponują rozwiniętym sektorem tekstylnym-odzieżowym, obejmującym zarówno produkcję surowców i tkanin, jak i gotowych wyrobów odzieżowych [1].



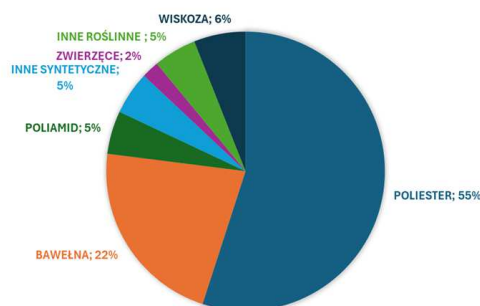
Rys. 1. Eksport odzieży i tekstyliów w 2024 roku (mld Euro) - piętnastu liderów światowych; Dane z „Facts & key figures of the european textile and clothing industry” EURATEX 2024 [1]

Poza czołową grupą eksporterów znajdują się gospodarki o mniejszej, lecz nadal istotnej skali działalności eksportowej. Stany Zjednoczone osiągnęły wartość eksportu wynoszącą 20 mld EUR, podczas gdy Pakistan (18 mld EUR) oraz Indonezja (13 mld EUR) umacniają swoją pozycję jako znaczący producenci tekstyliów i odzieży na rynkach międzynarodowych. W dalszej kolejności plasują się Republika Korei i Hongkong (Chiny), których eksport wyniósł po 10 mld EUR, a także Kambodża, Meksyk i Chińskie Tajpej, osiągające po 9 mld EUR. Zestawienie zamyka Wielka Brytania z wartością eksportu na poziomie 7 mld EUR [1].

Struktura geograficzna eksportu wskazuje na wyraźną dominację Azji, która skupia większość największych eksporterów sektora tekstylno-odzieżowego. Świadczy to o utrzymującej się specjalizacji regionu w produkcji i eksporcie wyrobów tekstylnych i odzieżowych oraz o wysokim stopniu integracji azjatyckich gospodarek z globalnymi sieciami produkcyjnymi. Jednocześnie silna pozycja Unii Europejskiej dowodzi, że konkurencyjność sektora nie jest determinowana wyłącznie kosztami pracy, lecz również zdolnością do generowania innowacji, rozwoju marek, wdrażania zaawansowanych technologii oraz

tworzenia produktów o wysokiej wartości dodanej [1].

W roku 2022 Światowa produkcja włókien wyniosła 116 milionów ton [2]. Dane przedstawione na rys. 2 wskazują na wyraźną dominację włókien syntetycznych, a w szczególności poliestru, który stanowił 55% światowej produkcji włókien w 2022 roku. Drugą pod względem udziału grupę surowców tworzyła bawełna, odpowiadająca za 22% globalnej produkcji. Pozostałe rodzaje włókien charakteryzowały się zdecydowanie mniejszym znaczeniem i obejmowały wiskozę (6%), poliamid (5%), inne włókna syntetyczne (5%), inne włókna roślinne (5%) oraz włókna pochodzenia zwierzęcego (2%) [3].



Rys. 2. Światowa produkcja włókien w roku 2022, wg danych Statisty 2024 [4]

Przedstawiona struktura potwierdza utrzymującą się przewagę materiałów syntetycznych w światowym przemyśle tekstylny-odzieżowym, wynikającą przede wszystkim z ich korzystnych właściwości użytkowych, wysokiej wydajności produkcji oraz relatywnie niskich kosztów wytwarzania. Jednocześnie stosunkowo niewielki udział włókien naturalnych i regenerowanych wskazuje na istotne wyzwania związane z transformacją sektora w kierunku bardziej zrównoważonych modeli produkcji i konsumpcji tekstyliów [4].

W roku 2023 światowa produkcja włókien wzrosła do 125 milionów ton, a w roku 2024 odnotowano dalsze zwiększenie - do 132 milionów ton [3]. Od 2000 roku produkcja ta wzrosła ponad dwukrotnie, a od czasu Porozumienia Paryskiego z 2015 roku, w którym kraje na całym świecie zobowiązały się do utrzymania globalnego wzrostu temperatury poniżej 2°C, a najlepiej poniżej 1,5°C, wzrosła ona o około 34 miliony ton. Obecnie odpowiada to około czterem tonom włókien produkowanych na sekundę. Oczekuje się, że produkcja osiągnie około 169 milionów ton w 2030 roku, jeśli działalność będzie kontynuowana bez zmian [3].

Największy wzrost globalnej produkcji włókien nastąpił w przypadku włókien syntetycznych na bazie paliw kopalnych, przy czym poliester nadal jest najczęściej produkowanym włóknom. Obecnie stanowi on 59% całkowitej globalnej produkcji włókien, z

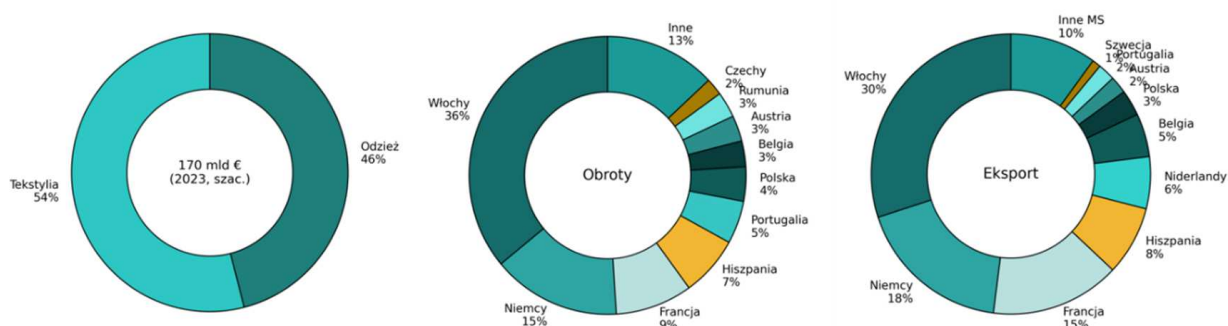
czego 88% pochodzi z paliw kopalnych. Poliester z recyklingu nadal jest wytwarzany głównie z plastikowych butelek (98%) [3].

Jednym z pozytywnych trendów jest wzrost popytu branży na włókna pochodzące z odpowiedzialnych źródeł zwierzęcych, między innymi dzięki programom takim jak Responsible Mohair Standard (RMS) i Responsible Alpaca Standard (RAS), które przyczyniają się do poprawy dobrostanu zwierząt i zarządzania środowiskiem [5].

Dane przedstawione w raporcie Textile Exchange's *Materials Market Report, 2025* [3] pokazują, że 34% światowej produkcji bawełny pochodzi obecnie z certyfikowanych źródeł, dwie trzecie sztucznych włókien celulozowych (MMCF) jest produkowanych z certyfikowanych lub kontrolowanych surowców.

Charakterystyka przemysłu włókienniczego w Europie

Europejski przemysł włókienniczo-odzieżowy stanowi istotny sektor gospodarki Unii Europejskiej, którego wartość obrotów w 2023 roku szacowano na około 170 mld EUR. Strukturę sektora tworzą dwa główne segmenty: przemysł tekstylny, odpowiadający za 54% obrotów, oraz przemysł odzieżowy, którego udział wynosi 46%. Oznacza to względnie zrównoważony rozwój obu części łańcucha wartości, przy nieznacznej przewadze produkcji tekstylnej – rys. 3 [4].



Rys. 3. Wartości produkcji, obrotów i eksportu w europejskim przemyśle włókienniczo-odzieżowym w roku 2023, wg danych Statisty 2024 [4]

Analiza struktury geograficznej wskazuje na silną koncentrację przemysłu włókienniczo-odzieżowego w kilku państwach członkowskich UE – rys. 3. Pod względem

wartości obrotów dominującą pozycję zajmują Włochy (36%), następnie Niemcy (15%), Francja (9%) oraz Hiszpania (7%). Istotną rolę odgrywają również Portugalia

(5%) i Polska (4%), co potwierdza znaczenie Europy Środkowo-Wschodniej i Południowej jako ważnych ośrodków produkcji tekstyliów i odzieży [4].

Podobna koncentracja występuje w strukturze eksportu – rys. 3. Największym eksporterem sektora pozostają Włochy, generujące 30% unijnego eksportu, przed Niemcami (18%) i Francją (15%). Znaczące udziały osiągają również Hiszpania (8%), Niderlandy (6%) oraz Belgia (5%). Polska odpowiada za 3% eksportu sektora, co wskazuje na jej rosnącą, choć nadal umiarkowaną pozycję konkurencyjną na rynku europejskim [4].

Przedstawione dane pozwalają stwierdzić, że europejski przemysł włókienniczo-odzieżowy charakteryzuje się wysokim poziomem specjalizacji i koncentracji geograficznej, przy dominującej roli państw Europy Zachodniej i Południowej. Jednocześnie sektor ten opiera swoją konkurencyjność nie tylko na zdolnościach produkcyjnych, lecz również na wysokiej wartości dodanej, rozwiniętym wzornictwie, innowacyjności oraz silnej pozycji europejskich marek na rynkach międzynarodowych.

W roku 2024 wartość europejskiego rynku włókien tekstylnych wyniosła 13,6 miliarda dolarów, generując około 28% globalnych przychodów w tej branży. Prognozy Grand View Research [6] wskazują na stabilny wzrost (CAGR 4,1%) do poziomu ponad 17,3 miliarda dolarów do 2030 roku.

Podobnie jak globalnie, także w Europie największym i najszybciej rosnącym segmentem są włókna syntetyczne. Głównym motorem napędowym są Niemcy, które generują najwyższe tempo wzrostu w tym sektorze [6]. Europejski rynek włókien naturalnych osiągnął wartość 14,2 miliarda dolarów w 2024 roku, biorąc pod uwagę szerokie zastosowania, w tym techniczne. Największy udział mają włókna pochodzenia roślinnego, a liderem wzrostu w tym segmencie są Włochy [6]. Unia Europejska wdraża rygorystyczne przepisy dotyczące strategii na rzecz zrównoważonych wyrobów włókienniczych. Przemysł stoi przed wymogiem drastycznego zwiększenia udziału recyklingu typu *textile-to-textile* (odzież w odzież), który obecnie stanowi margines rynku [6]. Europejski rynek

kompozytów wzmacnianych włóknami (szklanymi, węglowymi) odnotował w 2024 roku spadek produkcji o 5,6% (do poziomu 2,4 miliona ton), co cofnęło ten sektor do wyników z 2012 roku z powodu stagnacji w europejskim przemyśle motoryzacyjnym i budowlanym [6].

Charakterystyka przemysłu włókienniczego w Polsce

Przemysł włókienniczy i odzieżowy w Polsce stanowi jeden z istotnych segmentów przemysłu lekkiego oraz ważny element europejskich i globalnych łańcuchów dostaw. W ostatnich latach sektor ten podlegał intensywnym przemianom wynikającym z procesów globalizacji, cyfryzacji, rosnących wymagań środowiskowych oraz zmian w strukturze popytu konsumentów. Pomimo silnej konkurencji ze strony producentów azjatyckich, polski przemysł mody utrzymuje znaczącą pozycję na rynku europejskim dzięki wysokiej elastyczności produkcji, rozwiniętym kompetencjom projektowym oraz zdolności do realizacji krótkich serii produkcyjnych i zamówień o wyższej wartości dodanej.

Sektor włókienniczy i odzieżowy charakteryzuje się znacznym rozdrobnieniem organizacyjnym i dominacją przedsiębiorstw z sektora małych i średnich przedsiębiorstw (MŚP). Według danych branżowych w 2024 roku w Polsce funkcjonowało ponad 24 tys. przedsiębiorstw odzieżowych, przy czym większość z nich stanowiły mikroprzedsiębiorstwa zatrudniające do 9 pracowników. Szacuje się, że sektor włókienniczy i odzieżowy zapewnia zatrudnienie dla około 120–150 tys. osób, uwzględniając również najmniejsze podmioty gospodarcze [8].

Istotną cechą polskiego przemysłu włókienniczo-odzieżowego jest jego silna orientacja eksportowa. W 2023 roku wartość eksportu odzieży przekroczyła 10,9 mld EUR, co oznacza wzrost o ponad 70% w porównaniu z 2019 rokiem. Z kolei w 2024 roku wartość eksportu odzieży osiągnęła około 12,7 mld EUR, natomiast eksport odzieży, obuwia i akcesoriów modowych wyniósł około 16,6 mld EUR, co pozwoliło Polsce zająć pozycję jednego z najważniejszych eksporterów mody w Europie [7].

W strukturze produkcji obserwuje się stopniowe odchodzenie od modelu konkurencyjności opartego głównie na niskich kosztach pracy na rzecz specjalizacji w produktach o wyższej wartości dodanej. Coraz większe znaczenie mają:

- tekstylia techniczne i funkcjonalne,
- odzież specjalistyczna i ochronna,
- produkcja krótkoseryjna i personalizowana,
- projektowanie wzornicze,
- rozwiązania wykorzystujące technologie cyfrowe.

Polska należy również do znaczących producentów i eksporterów tekstyliów technicznych, zajmując istotne miejsce w europejskim rynku wyrobów specjalistycznych. W Polsce produkuje się geowłókniny dla budownictwa, włókniny medyczne, poszycia pneumatyczne, materiały filtracyjne oraz pasy transmisyjne. W 2024 r. Polska wyeksportowała tekstylia do zastosowań technicznych o łącznej wartości 117 mln USD, głównie do Niemiec (53,5 mln USD), Szwecji (6,93 mln USD) i Holandii (6 mln USD) [7,10].

W ostatnich latach sektor funkcjonował w warunkach licznych wyzwań ekonomicznych. Do najważniejszych należały wzrost cen energii, surowców i kosztów pracy, zakłócenia w globalnych łańcuchach dostaw po pandemii COVID-19 oraz rosnąca konkurencja ze strony importerów azjatyckich – głównie z Chin. Jednocześnie przedsiębiorstwa coraz silniej odczuwają skutki niedoboru wykwalifikowanych pracowników oraz procesów demograficznych prowadzących do zmniejszania zasobów pracy. Co więcej w 2024 roku 500 firm z sektora włókienniczego i odzieżowego wycofało się z rynku [8].

Z drugiej strony obserwuje się wyraźne przyspieszenie procesów transformacji technologicznej i środowiskowej sektora. Coraz większe znaczenie zyskują inwestycje w:

- automatyzację i robotyzację procesów produkcyjnych,
- technologie Przemysłu 4.0,
- projektowanie wspomagane komputerowo (CAD/CAM),
- cyfrowe zarządzanie łańcuchem dostaw,
- gospodarkę obiegu zamkniętego,

- recykling tekstyliów i ograniczanie zużycia zasobów naturalnych [9].

Transformacja ta jest dodatkowo wzmocniana przez politykę Unii Europejskiej w zakresie zrównoważonych i cyrkularnych tekstyliów oraz rosnące oczekiwania konsumentów dotyczące odpowiedzialnej społecznie i środowiskowo produkcji.

Podsumowując, współczesny przemysł włókienniczy i odzieżowy w Polsce charakteryzuje się wysokim stopniem internacjonalizacji, dominacją sektora MŚP, rosnącą specjalizacją w produktach o wysokiej wartości dodanej oraz postępującą transformacją cyfrową i ekologiczną. Mimo licznych wyzwań kosztowych i demograficznych sektor utrzymuje istotną pozycję konkurencyjną w Europie i posiada znaczący potencjał dalszego rozwoju, szczególnie w obszarze innowacyjnych tekstyliów, produkcji zrównoważonej oraz rozwoju kompetencji związanych z gospodarką cyfrową i cyrkularną [7].

Wpływ przemysłu włókienniczego na środowisko

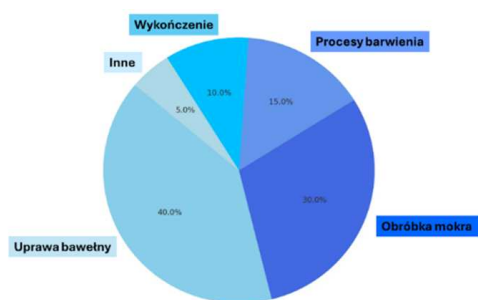
Powszechnie uważa się, że przemysł włókienniczy i odzieżowy od zawsze znacząco wpływał na środowisko, przyczyniając się do zużycia zasobów, zanieczyszczenia wody, zanieczyszczenia powietrza oraz generowania zanieczyszczeń pochodzących z produkcji odpadów stałych [11].

Kluczowe rodzaje oddziaływań na środowisko obejmują:

- **Gazy cieplarniane:** sektor włókienniczy i odzieżowy odpowiada za około 10% globalnej emisji dwutlenku węgla, co stanowi więcej niż wszystkie międzynarodowe loty i transport morski razem wzięte;
- **Zużycie wody:** jest drugim co do wielkości konsumentem wody na świecie;
- **Zanieczyszczenie wody:** szacuje się, że blisko 20% światowych ścieków przemysłowych pochodzi z barwienia i wykończania materiałów włókienniczych;
- **Odpady i mikroplastik:** zatrażający jest fakt, że 85% wszystkich tekstyliów trafia co roku na wysypiska

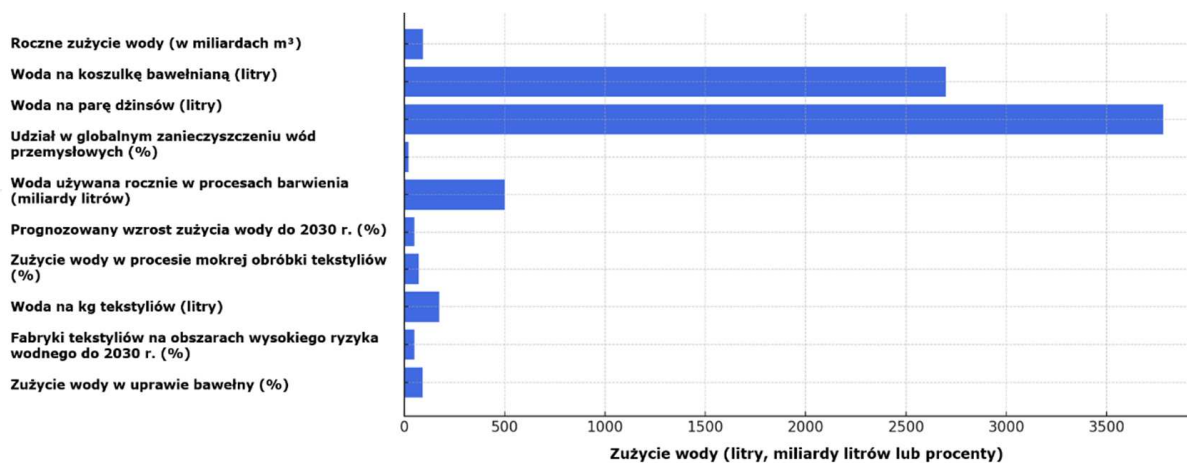
śmieci lub do spalarni, podczas gdy pranie syntetycznych ubrań powoduje emisję 500 000 ton mikroplastiku do oceanów rocznie; szacuje się, że materiały włókiennicze i odzieżowe są źródłem 35% globalnej ilości mikroplastiku w wodzie [11].

Pomimo faktu, że współczesne włókiennictwo charakteryzuje się coraz niższym zużyciem wody, to problem powstających ścieków poprocesowych jest wciąż aktualny. Przy produkcji tekstyliów, włączając w to uprawę bawełny, zużywa się 93-100 miliardów m³ wody rocznie. Stanowi to 4% globalnego poboru czystej wody [12].



Rys. 4. Struktura zużycia wody w cyklu produkcyjnym przemysłu tekstylnego i odzieżowego [13]

Dane przedstawione na rys. 4 wskazują, że największy udział w całkowitym zużyciu wody w przemyśle włókienniczym i odzieżowym ma uprawa bawełny, odpowiadająca za 40% wykorzystania zasobów wodnych. Drugim najbardziej wodochłonnym etapem jest obróbka mokra tekstyliów, której udział wynosi 30%, a procesy barwienia generują dodatkowe 15% zużycia wody. Na procesy wykończenia przypada 10%, a pozostałe procesy produkcyjne odpowiadają za 5% całkowitego zapotrzebowania na wodę [13]. Przedstawiona struktura potwierdza, że największa presja na zasoby wodne występuje na etapie pozyskiwania surowca oraz w procesach mokrej obróbki materiałów. Oznacza to, że działania ukierunkowane na ograniczenie zużycia wody powinny koncentrować się przede wszystkim na wdrażaniu bardziej zrównoważonych metod uprawy bawełny oraz innowacyjnych technologii produkcyjnych, umożliwiających redukcję zużycia wody w procesach przetwarzania i wykańczania tekstyliów. Dane te potwierdzają, że racjonalizacja gospodarki wodnej stanowi jeden z kluczowych warunków transformacji przemysłu mody w kierunku modelu zrównoważonego rozwoju.



Rys. 5. Wybrane wskaźniki zużycia wody w przemyśle włókienniczym i odzieżowym [13]

Roczne zużycie wody w sektorze w roku 2025 wyniosło około 93 mld m³, a produkcja pojedynczych wyrobów wymaga znacznych ilości zasobów wodnych – wytworzenie bawełnianej koszulki pochłania około 2 700 litrów wody, natomiast pary dżinsów około

3 800 litrów. Procesy barwienia i wykańczania tekstyliów zużywają rocznie około 500 mld litrów wody, a przemysł tekstylny odpowiada za około 20% globalnego zanieczyszczenia wód przemysłowych [13].

Jednocześnie prognozy wskazują na dalszy wzrost presji na zasoby wodne. Do 2030 roku około 47% zakładów tekstylnych może funkcjonować na obszarach wysokiego ryzyka wodnego. Istotnym źródłem zużycia wody pozostaje również uprawa bawełny, odpowiadająca za około 70% całkowitego zużycia wody w cyklu życia tego surowca, podczas gdy mokra obróbka tekstyliów generuje około 11% zużycia wody w procesach produkcyjnych. Przedstawione dane potwierdzają, że ograniczanie wodochłonności procesów technologicznych stanowi jedno z kluczowych wyzwań transformacji przemysłu mody w kierunku zrównoważonego rozwoju [13].

Średnie zużycie wody w procesie produkcji różnych rodzajów włókien jest zróżnicowane w zależności od rodzaju włókna oraz

etapu jego przetwarzania (tabela 1) [14]. Na etapie wytwarzania włókien najniższym zużyciem wody charakteryzuje się bawełna (nie wliczając uprawy), dla której wartość ta wynosi 10–15 l/kg, oraz włókna pochodzenia zwierzęcego, których zapotrzebowanie mieści się w przedziale 2,5–50 l/kg. Wyższe zużycie odnotowano w przypadku wiskozy (60 l/kg) oraz poliestru (70 l/kg) [14]. Znacznie większe zapotrzebowanie na wodę występuje na etapie obróbki materiałów włókienniczych. Dla bawełny zużycie wynosi 100–125 l/kg, dla wiskozy 65–169 l/kg, dla włókien zwierzęcych 100–200 l/kg, natomiast dla poliestru 70–136 l/kg. Najwyższą maksymalną wartością charakteryzują się materiały pochodzenia zwierzęcego, których obróbka może wymagać nawet 200 l wody na kilogram materiału [14].

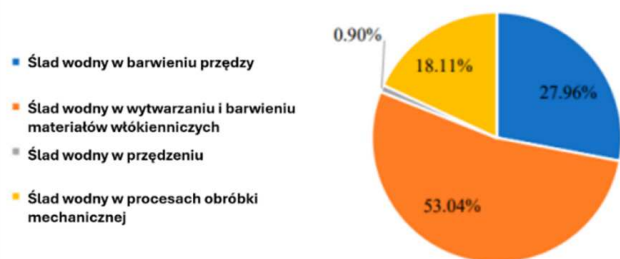
Tabela 1. Średnie zużycie wody w procesie produkcji różnych rodzajów włókien (L/kg) [14]

L/kg	Bawełna	Wiskoza	Zwierzęce	Poliester
Wytwarzanie włókien	10 – 15	60	2.5 – 50	70
Obróbka materiałów włókienniczych	100 – 125	65-169	100 – 200	70 – 136

Przedstawione dane potwierdzają, że etap przetwarzania i wykończania materiałów włókienniczych jest znacznie bardziej wodochłonny niż samo wytwarzanie włókien. Jednocześnie duża rozpiętość wartości zużycia

wody wskazuje na istotny wpływ stosowanych technologii produkcyjnych i metod obróbki na środowiskowy profil poszczególnych rodzajów włókien. Z perspektywy zrównoważonego rozwoju przemysłu włókienniczego i mody wyniki te podkreślają konieczność wdrażania technologii ograniczających zużycie wody, szczególnie w procesach mokrej obróbki i wykończania tekstyliów [14].

Ze zróżnicowanym zużyciem wody w zależności od rodzaju włókna oraz etapu jego przetwarzania wiąże się zróżnicowany ślad wodny [15].



Rys. 6. Ślad wodny na różnych etapach wytwarzania tekstyliów [15]

Dane przedstawione na rys. 6 wskazują, że ślad wodny w procesie produkcji tekstyliów jest nierównomiernie rozłożony

pomiędzy poszczególne etapy wytwarzania. Największy udział, wynoszący 53,04%, przypada na wytwarzanie i barwienie materiałów

włókienniczych. Drugim pod względem znaczenia etapem jest barwienie przędzy, odpowiadające za 27,96% całkowitego śladu wodnego. Potwierdza to, że procesy mokrej obróbki i stosowania środków chemicznych należą do najbardziej zasobochłonnych pod względem zużycia wody [15]. Znaczący udział procesu barwienia wynika z konieczności wielokrotnego płukania, utrwalania barwników oraz stosowania licznych substancji pomocniczych. Z kolei procesy obróbki mechanicznej generują 18,11% śladu wodnego, co wskazuje, że mimo mniejszej wodochłonności w porównaniu z procesami mokrymi, nadal wywierają istotny wpływ na całkowite zużycie zasobów wodnych [15]. Najmniejszy udział odnotowano w przypadku przędzenia, którego ślad wodny wynosi zaledwie 0,90%. Oznacza to, że proces ten charakteryzuje się relatywnie niskim zapotrzebowaniem na wodę i ma marginalny wpływ na całkowity ślad wodny sektora. Przedstawiona struktura potwierdza, że ponad 80% śladu wodnego w produkcji tekstyliów powstaje na etapach związanych z wytwarzaniem, barwieniem i wykończaniem materiałów włókienniczych. Wyniki te wskazują, że działania na rzecz ograniczenia presji środowiskowej przemysłu włókienniczego i odzieżowego powinny koncentrować się przede wszystkim na modernizacji procesów obróbki mokrej, wdrażaniu technologii niskoemisyjnych i wodooszczędnych oraz zwiększaniu efektywności gospodarowania wodą w procesach barwiących i wykończalniczych [15].

Woda w procesach wykończalniczych

Poziom zużycia wody na potrzeby przemysłu w Polsce w okresie 2020 – 2024 charakteryzował się dużą zmiennością – rys. 7. W latach 2020–2022 obserwowano systematyczny wzrost poboru wody – z około 5,92 mln dam³ w 2020 r. do 6,37 mln dam³ w 2021 r. oraz 6,47 mln dam³ w 2022 r., co oznacza wzrost o blisko 9,3% względem poziomu z 2020 r. W 2023 r. nastąpił wyraźny spadek zużycia wody do około 5,41 mln dam³, tj. o około 16,4% w porównaniu z rokiem poprzednim. W 2024 r. odnotowano natomiast niewielkie odbicie, a pobór wody wzrósł do około

5,49 mln dam³, pozostając jednak na poziomie niższym niż w latach 2020–2022 [16].



Rys. 7. Zużycie wody w Polsce na potrzeby przemysłu w latach 2020–2024, Raport GUS, 2025 [16]

Przedstawione dane wskazują, że po okresie wzrostu zapotrzebowania na wodę w przemyśle nastąpiła faza ograniczenia jej zużycia. Tendencja ta może być związana z wdrażaniem rozwiązań zwiększających efektywność gospodarowania zasobami wodnymi, zmianami w strukturze produkcji przemysłowej oraz rosnącym znaczeniem działań na rzecz zrównoważonego rozwoju i racjonalizacji wykorzystania zasobów naturalnych. Wyniki te podkreślają znaczenie monitorowania zużycia wody oraz wdrażania technologii umożliwiających dalsze ograniczanie presji sektora przemysłowego na zasoby wodne.

W polskich zakładach włókienniczych podstawowym źródłem zaopatrzenia w wodę są wody głębinowe. Stanowią one 88% całkowitego poboru wody, co świadczy o silnym uzależnieniu sektora od własnych ujęć podziemnych oraz wysokim znaczeniu zasobów wód podziemnych dla funkcjonowania procesów produkcyjnych (rys. 8) [12]. Znacznie mniejsze znaczenie mają pozostałe źródła zaopatrzenia. Woda wodociągowa odpowiada za 7% poboru, natomiast wody powierzchniowe pochodzące z rzek stanowią jedynie 5% całkowitego zużycia wody. Taka struktura poboru może wynikać z dużego i stosunkowo stabilnego zapotrzebowania sektora na wodę o odpowiednich parametrach jakościowych, niezbędną do realizacji procesów technologicznych, w szczególności barwienia, wykańczania i mokrej obróbki tekstyliów [12].



Rys. 8. Źródła poboru wody w polskich zakładach włókienniczych [12]

Przedstawione dane wskazują, że przemysł włókienniczy w Polsce jest w znacznym stopniu zależny od dostępności zasobów wód podziemnych. Z perspektywy zrównoważonego rozwoju oraz adaptacji do zmian klimatycznych struktura ta podkreśla konieczność wdrażania rozwiązań zwiększających efektywność gospodarowania wodą, rozwijania systemów recyrkulacji i ponownego wykorzystania wody procesowej oraz ograniczania presji na zasoby wodne poprzez stosowanie technologii o obniżonej wodochłonności.

Procesy mokre we włókiennictwie i krótka charakterystyka generowanych emisji

Chemicznej obróbce wstępnej poddawane są wyroby z włókien naturalnych, sztucznych i syntetycznych, zarówno w postaci przędzy, tkanin czy dzianin, w celu przygotowania ich do należytego przeprowadzenia dalszych operacji wykończalniczych, takich jak bielenie, barwienie, drukowanie, czy apreturowanie. Ma ona na celu usunięcie z tych wyrobów preparacji przędzalniczych i dziewiarskich, klejonek tkackich i innych chemicznych środków nanoszonych na nie we wcześniejszych mechanicznych etapach przerobu, które mogłyby utrudnić przebieg dalszych operacji wykończalniczych. Podczas prania wyrobów z włókien syntetycznych około 80% preparacji (głównie oleje i środki powierzchniowo czynne) jest uwalniane do ścieków, a pozostałe 20% może być wyrzucane do powietrza podczas późniejszej obróbki wysokotemperaturowej (suszenie i termostabilizacja) [12].

Tabela 2. Emisje z procesu obróbki wstępnej materiałów włókienniczych

Ciepło	Ścieki	Obciążenie ścieków
Wysoka temperatura procesów, ale coraz mniejsze zużycie energii z powodu redukcji krotności kąpieli	Duże zużycie wody	Duże zużycie środków pomocniczych, wysokie ChZT, BZT, substancje rozpuszczone i/lub stałe [14]

Celem procesu bielenia włókien, głównie naturalnych (bawełna, len) jest usunięcie barwnych zanieczyszczeń. Proces ten wykonywany jest najczęściej w kąpielach alkalicznych zawierających nadtlenek wodoru (do bielenia zarówno wyrobów z włókien bawełny oraz ich mieszanek z włóknami syntetycznymi), znacznie rzadziej inne środki bielące: podchloryn sodu, chloryn sodu lub równowagowy kwas nadoctowy czy ozon.

Tabela 3. Emisje z procesu bielenia materiałów włókienniczych

Ciepło	Ścieki	Obciążenie ścieków
Wysoka temperatura procesu	Duże zużycie wody, duża liczba płukań	Wysokie pH kąpieli bielącej, szczególnie w przypadku wyrobów z włókien celulozowych [14]

Barwienie wyrobów włókienniczych jest fizykochemicznym procesem dyfuzji barwników do wnętrza włókien, w wyniku którego włókna te zostają zabarwione. Procesowi barwienia poddaje się: luźne włókna, przędzę, tkaniny, dzianiny, a także pewne asortymenty dzianych artykułów odzieżowych, tzw. wyroby odpasowane. Użycie odpowiedniej grupy barwników zależy przede wszystkim od surowca włókienniczego oraz wymaganych właściwości użytkowych, które są determi-

wane przez przeznaczenie gotowego wyrobu.

Współczesne technologie barwienia materiałów włókienniczych wykorzystują urządzenia o niskiej krotności kąpieli barwiarskiej, wynoszącej najczęściej 1:4–1:6, podczas gdy najbardziej zaawansowane rozwiązania osiągają wartości rzędu 1:3–1:5. Oznacza to ograniczenie zużycia wody o około 50–70% w porównaniu z tradycyjnymi aparatami barwiarskimi, pracującymi przy krotności kąpieli na poziomie 1:10–1:20. Redukcja krotności kąpieli przyczynia się jednocześnie do zmniejszenia zużycia energii, środków chemicznych oraz ilości generowanych ścieków, stanowiąc jeden z kluczowych kierunków transformacji przemysłu włókienniczego w kierunku zrównoważonej produkcji [17].

Tabela 4. Emisje z procesu barwienia materiałów włókienniczych

Ciepło	Ścieki	Obciążenie ścieków
Wysoka temperatura procesu, szczególnie w przypadku wyrobów z włókien syntetycznych, ale coraz mniejsze zużycie energii z powodu redukcji krotności kąpieli	Relatywnie duże zużycie wody, chociaż stosowane są coraz mniejsze krotności kąpieli, co powoduje generowanie mniejszej ilości ścieków poфарbiarskich	Relatywnie duże zużycie środków pomocniczych, ale z powodu zmniejszenia krotności kąpieli zużywane jest coraz mniej barwników i środków pomocniczych, wysokie BZT, możliwe występowanie metali ciężkich [14]

Drukowanie jest techniką ozdabiania wyrobów włókienniczych poprzez przenoszenie barwnych wzorów na powierzchnie tych wyrobów. Wyróżnia się kilka technik druku: druk filmowy ręczny (sitodruk), druk filmowy mechaniczny z szablonami płaskimi lub cylindrycznymi, druk transferowy z użyciem

barwników zawieszinowych oraz beznośnikowy druk dyszowy natryskowy (atramentowy).

Tabela 5. Emisje z procesu drukowania materiałów włókienniczych

Ciepło	Ścieki	Obciążenie ścieków
Wysoka temperatura procesu utrwalania wydruków	Minimalne zużycie lub brak zużycia wody w przypadku druku pigmentowego, sublimacyjnego i transferowego. Natomiast w przypadku druku dyszowego, szczególne za pomocą barwników reaktywnych wymagane są procesy prania i płukania po procesie parowania	Uzasadnienie jak w przypadku ścieków, wysokie BZT w przypadku druku reaktywnego [14]

Obróbka końcowa wyrobów włókienniczych obejmuje wszystkie procesy, które służą do nadania wyrobom włókienniczym – tkaninom, dzianinom, włókninom odpowiedniego wyglądu – powierzchnia gładka, pomarszczona, błyszcząca matowa, włochata oraz właściwych cech użytkowych.

Mogą to być cechy związane z efektem wizualnym, trwałością kształtu, chwytem i właściwościami specjalnymi, takimi jak wodoodporność, niepalność, właściwości przeciwdrobnoustrojowe. Wyrobom z niektórych rodzajów włókien nadaje się właściwości specyficzne dla tych wyrobów, np. wyrobom z włókien syntetycznych – właściwości antystatyczne i odporność na pilling, wyrobom wełnianym – odporność na spilśnianie i molo-

odporność, wyrobom bawełnianym – właściwości niemnące.

Tabela 6. Emisje z procesów obróbki końcowej materiałów włókienniczych

Ciepło	Ścieki	Obciążenie ścieków
Wysoka temperatura procesów, ale coraz mniejsze zużycie energii z powodu redukcji krotności kąpieli	Mniejsze zużycie wody niż w przypadku procesów bieleńia i barwienia	Niskie BZT, niski odczyn zasadowy [14]

Możliwości usuwania zanieczyszczeń ze ścieków włókienniczych

Ścieki włókiennicze należą do jednych z najbardziej zróżnicowanych ścieków przemysłowych. Procesy wykończalnicze wyrobów włókienniczych obejmują szereg jednostkowych operacji, w których stosuje się znaczną ilość różnych związków nieorganicznych, alkaliów, kwasów, jak również szereg związków organicznych, w tym barwników. W zależności od rodzaju stosowanego włókna, stosuje się różne środki chemiczne, barwniki i warunki prowadzenia procesu. Współczesny przemysł włókienniczy dostarcza na rynek wyroby, które spełniają wiele funkcji użytkowych. Analiza polskiego przemysłu włókienniczego wykazała, że w Polsce, poza pojedynczymi przypadkami, praktycznie nie ma zakładów włókienniczych, które stosowałyby kompleksową technologię oczyszczania ścieków. Tylko nieliczne zakłady stosują wstępne podczyszczanie ścieków za pomocą strącania chemicznego i usuwania osadów [12]. Obecnie w wielu ośrodkach badawczych, w tym w Sieci Badawcza Łukasiewicz – Łódzkim Instytucie Technologicznym prowadzone są badania nad rozwojem i modyfikacją różnych metod usuwania zanieczyszczeń ze ścieków, w tym ścieków włókienniczych. Każda z metod oczyszczania ma swoje ograniczenia i wady. Tanie metody takie jak koagulacja są zazwyczaj mało wydajne i nieekologiczne. Techniki wysoko

zaawansowane pociągają za sobą większe koszty operacyjne procesu.

Właściwy dobór technologii dla określonych strumieni ścieków umożliwia obniżenie kosztów przy zachowaniu wymaganej jakości odzyskanej wody.

Metody pogłębionego utleniania

Do metod pogłębionego utleniania zalicza się chemiczne procesy wykorzystujące ozon oraz inne silne utleniacze, takie jak układy UV/H_2O_2 , O_3/H_2O_2 , TiO_2/UV czy Fe^{2+}/H_2O_2 . Procesy te prowadzą do chemicznej modyfikacji związków organicznych. Dynamiczny rozwój instrumentalnych metod analitycznych przyczynia się do stałego poszerzania wiedzy na temat mechanizmów reakcji utleniania, obejmując także związki występujące w ściekach w bardzo niskich stężeniach (rzędu nanogramów), w tym farmaceutyki.

Ozon jako czynnik utleniający, jest związkiem nietrwałym, który ulega rozkładowi w reakcjach z wybranymi składnikami obecnymi w wodzie i ściekach, generując wysoko reaktywne rodniki hydroksylowe $\cdot OH$. W ostatnich latach obserwuje się rosnące zainteresowanie zastosowaniem ozonu, co wiąże się m.in. z obniżeniem kosztów jego wytwarzania. Znajduje to odzwierciedlenie w coraz liczniejszych publikacjach dotyczących wykorzystania ozonowania do degradacji różnorodnych związków organicznych.

Proces utleniania z wykorzystaniem układu UV/H_2O_2 przebiega z udziałem rodników hydroksylowych powstających w wyniku inicjacji nadtlenu wodoru promieniowaniem UV. Metoda ta znajduje zastosowanie w usuwaniu wielu grup związków, takich jak pestycydy, farmaceutyki czy barwniki [18]. Skuteczność procesu zależy od rodzaju utlenianej substancji i może wahać się od kilkunastu do nawet 100%. Natomiast zastosowanie wyłącznie promieniowania UV lub samego H_2O_2 jest zazwyczaj mało efektywne, a stopień redukcji zanieczyszczeń ogranicza się zwykle do kilku procent.

Filtracja membranowa

Filtracja membranowa stanowi jedną z efektywnych metod usuwania związków ze ścieków. Jest to proces separacyjny, w którym wykorzystuje się różnice we

właściwościach fizykochemicznych składników, takich jak wielkość cząsteczek, ciśnienie cząstkowe pary, powinowactwo chemiczne, ładunek elektryczny oraz inne cechy chemiczne. Technologie membranowe znajdują szerokie zastosowanie w wielu sektorach, w tym w przemyśle spożywczym, farmaceutycznym oraz w ochronie środowiska. Ich istotną wadą są jednak wysokie koszty eksploatacyjne, wynikające m.in. z dużej podatności membran na zanieczyszczenia. Skuteczność zatrzymywania poszczególnych związków zależy od szeregu czynników, takich jak właściwości membrany, budowa chemiczna, masa cząsteczkowa i ładunek usuwanej substancji, a także jej powinowactwo do materiału membrany.

Kluczowym zagadnieniem pozostaje analiza zjawiska foulingu, czyli zanieczyszczania membran w trakcie filtracji oraz opracowanie metod ograniczających jego występowanie. Proces ten ma złożony charakter i wymaga szczegółowych badań. Na retencję związków organicznych podczas filtracji z wykorzystaniem membran nanofiltracyjnych (NF) i odwróconej osmozy (RO) wpływają m.in. zjawiska wytrącania osadów oraz obecność innych składników organicznych i nieorganicznych w roztworze [18]. Dodatkowym problemem jest depozycja trudno rozpuszczalnych soli na powierzchni membrany, co prowadzi do spadku wydajności procesu [18]. Osadzanie się nieorganicznych cząstek może również modyfikować gęstość ładunku powierzchniowego membrany.

W odpowiedzi na te wyzwania rozwijane są zintegrowane systemy oczyszczania, w których procesy membranowe są wspomagane przez metody wstępnej obróbki. Równocześnie prowadzone są intensywne badania nad nowymi materiałami membranowymi wzbogaconymi o nanokomponenty, charakteryzującymi się zwiększoną odpornością na fouling. Doniesienia literaturowe wskazują, że wprowadzenie nanomateriałów do struktury polimerowej membrany poprawia jej odporność na trwałe zanieczyszczenia, zwłaszcza związane z obecnością naturalnej materii organicznej w wodzie [18].

Procesy biologicznego oczyszczania

Procesy biologicznego oczyszczania ścieków należą do najbardziej ekonomicznych i przyjaznych środowisku rozwiązań. Należy jednak podkreślić, że wiele związków obecnych w ściekach wykazuje znaczną odporność na biodegradację. W zależności od charakteru zanieczyszczeń stosuje się procesy tlenowe, beztlenowe lub ich kombinacje, takie jak układy sekwencyjne (np. reaktory SBR).

Jednym z najbardziej perspektywicznych kierunków rozwoju są bioreaktory membranowe (MBR), które przewyższają tradycyjne systemy oczyszczania wody i ścieków. Do ich głównych zalet należą m.in. prosta konfiguracja przepływu, stabilna i wysoka jakość oczyszczonych ścieków, możliwość pracy przy dużych obciążeniach objętościowych, ograniczona produkcja osadu nadmiarowego oraz utrzymywanie wysokiego stężenia biomasy bez problemów związanych z jej sedymentacją. Ponadto systemy MBR charakteryzują się większą odpornością na wahania warunków pracy [18]. Istotną poprawę efektywności usuwania zanieczyszczeń można uzyskać poprzez integrację procesów biologicznych z innymi metodami, np. zaawansowanymi procesami utleniania.

Wdrażanie nowoczesnych technologii w przemyśle włókienniczym wymaga ścisłej współpracy pomiędzy jednostkami naukowymi a przedsiębiorstwami. W praktyce wielu przedsiębiorców w Polsce nie posiada wystarczającej wiedzy na temat dostępnych rozwiązań w zakresie oczyszczania ścieków i odzysku wody. Często potrzebują oni również wsparcia w interpretacji przepisów prawnych dotyczących ochrony środowiska i gospodarki wodnej, a także pomocy w pozyskiwaniu środków finansowych na wdrażanie innowacyjnych technologii w procesach produkcyjnych.

Podziękowanie: Praca naukowa dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Nauka dla Społeczeństwa II”: projekt nr NdS-II/SN/0269/2023/01 pt. „Woda, bezcenny surowiec – działania na rzecz jej

ochrony”, kwota dofinansowania 994 800,00 zł. Całkowita wartość projektu 994 800,00 zł
Termin realizacji projektu: 2023-2026.



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego



Literatura

1. Facts & key figures of the european textile and clothing industry”, EURATEX 2024; ura-tex.eu/wp-content/uploads/EURATEX-Facts-Key-Figures-2024.pdf.
2. Textile Exchange's *Materials Market Report*, 2022; <https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2022/>.
3. Textile Exchange's *Materials Market Report*, 2025; <https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2025/>.
4. Statista, 2025, <https://www.statista.com/>.
5. Textile Exchange's *Materials Market Report*, 2024; <https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2024/>.
6. Europe Textile Fiber Market Size & Outlook, 2025-2030; <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/textile-fiber-market/europe>.
7. The Polish clothing industry – a growing role in international trade, 30.04.2025; PKO BP, Rynki międzynarodowe: odzież. Sytuacja bieżąca i prognozy do 2028 ; <https://www.trade.gov.pl/>.
8. Polski przemysł odzieżowy i tekstylny zmaga się z rosnącymi kosztami, importem i kurczącym się rynkiem, Poland Insight, 20.08.2025; <https://polandinsight.com/>.
9. Poland Textile Market Report- Q1 2025, 1.04.2025; <https://www.reportlinker.com/>.
10. The observatory of Economic Complexity: Textiles for technical uses in Poland; <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/textiles-for-technical-uses/reporter/>.
11. Prehu I.: 5 environmental impacts of textile industry, and 3 ways to be more sustainable; <https://watertreatmentmagazine.com/en/impact-textile-industry/>.
12. Żyłła, R. Gospodarka o obiegu zamkniętym w przemyśle włókienniczym. W: W kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym – możliwości i wyzwania. (2023). Sieć Badawcza Łukasiewicz – Łódzki Instytut Technologiczny.
13. Water Consumption in Textile Industry Statistics 2025; <https://bestcolorful-socks.com/blogs/news/water-consumption-in-textile-industry-statistics>
14. Mikucioniene D., Mínguez-García D., Reazuddin Repon Md., Milašius R., Priniotakis G., Chronis I., Kiskira K., Hogeboom R., Belda-Anaya R., Díaz-García P. Understanding and addressing the water footprint in the textile sector: A reviewAUTEX Research Journal, Vol. 25, No.1, 2024, 20240004, DOI 10.1515/aut-2024-0004
15. International Journal of Akademik Research in Business and Social Sciences, Vol. 12, No. 10, 2022
16. Raport GUS, 2025
17. Hussain, T., Wahab, A. (2018). A critical review of the current water conservation practices in textile wet processing. Journal of Cleaner Production, 198, 806–819.
18. Projekt nr NdS-II/SN/0269/2023/01 pn.: Woda, bezcenny Surowiec – działania na rzecz jej ochrony”

Artykuł recenzowany

Odzysk wody w przemyśle włókienniczym - dobór optymalnej technologii oczyszczania ścieków włókienniczych

Magdalena Olak-Kucharczyk^{1*}, Martyna Gloc^{1,2}, Iwona Kucińska – Król¹, Joanna Olczyk¹, Anetta Walawska¹, Renata Żyła¹

¹ Sieć Badawcza Łukasiewicz – Łódzki Instytut Technologiczny, Centrum Gospodarki o Obiegu Zamkniętym, ul. Brzezińska 5/15, 92-103, Łódź, Polska.

² Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Katedra Inżynierii Bioprocessowej, ul. Wólczańska 213, 93-005, Łódź, Polska.

*email: magdalena.olak-kucharczyk@lit.lukasiewicz.gov.pl

Abstrakt: W pracy przedstawiono wyniki badań oczyszczania ścieków włókienniczych przy zastosowaniu różnych metod, m.in. metod fizykochemicznych, chemicznego utleniania oraz ich połączenia. Do badań zastosowano rzeczywiste ścieki pobrane z zakładu włókienniczego znajdującego się na terenie Polski. Surowe i oczyszczone ścieki badano pod kątem chemicznego zapotrzebowania na tlen, ogólnego węgla organicznego, chlorków i innych kluczowych parametrów. Opracowana technologia umożliwiła uzyskanie optymalnych parametrów oczyszczonych ścieków pozwalających na ich ponowne zastosowanie.

Słowa kluczowe: odzysk wody, ścieki włókiennicze, technologie oczyszczania ścieków, ozonowanie, filtracja membranowa.

Wstęp

W ostatnich latach rośnie społeczna świadomość dotycząca skażenia środowiska substancjami niebezpiecznymi, w tym substancjami organicznymi i nieorganicznymi pochodzenia antropogenicznego, które stanowi bardzo istotny problem na skalę światową. Wyraźnie widać to w zaostrzających się regulacjach prawnych zarówno Unii Europejskiej, jak i poszczególnych państw w zakresie dopuszczalnych wartości wskaźników emisji zanieczyszczeń do środowiska [1, 2]. Pogłębiający się deficyt wody słodkiej na świecie wraz z pogarszającym się stanem wód w sposób synergiczny wywołują presję na środowisko naturalne. Woda jest jednym z kluczowych surowców dla wielu gałęzi przemysłu. Duże znaczenie ma zarówno wielkość jak i jakość zasobów wodnych. Jedną z najbardziej zasobo- i wodochłonnych gałęzi gospodarki, a

jednocześnie stanowiącą jedno z głównych źródeł zanieczyszczenia środowiska wodnego jest przemysł włókienniczy. Wyprodukowanie 1 tony tekstyliów wymaga zużycia 100-200 m³ wody, z której 80-90% jest odprowadzana jako ścieki [3]. Woda w przemyśle włókienniczym stosowana jest do szeregu procesów takich jak obróbka wstępna, bieleń, barwienie, pranie, płukanie, wykończenie. Procesy wykończenia wyrobów włókienniczych obejmują szereg operacji jednostkowych, w których wykorzystuje się znaczną ilość różnych związków nieorganicznych w tym soli, zasad, kwasów, a także niektórych związków organicznych [4]. Zanieczyszczenie środowiska wodnego przez przemysł włókienniczy stanowi poważny problem ekologiczny i zdrowotny. Ścieki włókiennicze wywierają silny wpływ na ekosystemy wodne. Ścieki te cechują się często toksycznością, złożonym składem chemicznym oraz trudnością w oczyszczaniu. Obecność intensywnie zabarwionych związków w ściekach ogranicza przenikanie światła słonecznego do wody, co prowadzi do zahamowania fotosyntezy roślin wodnych [5, 6].

Złożony i różnorodny skład ścieków włókienniczych sprawia, że opracowanie optymalnej technologii ich oczyszczania jest zadaniem trudnym i wymagającym szeregu badań. Ścieki z przemysłu włókienniczego należą do jednych z najbardziej problematycznych ścieków przemysłowych ze względu na wysoką zawartość barwników syntetycznych, związków organicznych, soli oraz metali ciężkich. Charakteryzują się one niską biodegradowalnością i dużą zmiennością składu, co utrudnia ich skuteczne oczyszczanie [7]. Pierwszym etapem oczyszczania ścieków

tekstylnych powinno być usunięcie zanieczyszczeń unoszących się i sedymentujących, takich jak cząstki zawieszone cząstki organiczne, nadmiar oleju i smaru oraz piasek. Efektem wstępnego oczyszczania jest oddzielenie granulek, cząstek zawieszonych od nieoczyszczonych ścieków. W dalszych etapach oczyszczania tj. etapie podstawowego oczyszczania zastosować można koagulację czy też flokulację, natomiast w etapie wtórnego oczyszczania stosowane są zazwyczaj procesy biologiczne. Wtórne oczyszczanie ścieków ma na celu obniżenie zapotrzebowania na tlen oraz usunięcie lub redukcję rozpuszczonych i koloidalnych składników organicznych i barwy ze ścieków [4]. Ścieki tekstylne często wymagają trzeciego stopnia oczyszczania lub zaawansowanego oczyszczania w celu usunięcia określonych zanieczyszczeń lub przygotowania oczyszczonych ścieków do ponownego zastosowania. Wśród najczęściej stosowanych metod trzeciego stopnia oczyszczania wymienić należy adsorpcję, elektrokoagulację i filtrację membranową. Liczne zanieczyszczenia z tego rodzaju ścieków mogą być również usuwane przy zastosowaniu ozonowania lub innych metod chemicznego utleniania. W rezultacie techniki oczyszczania trzeciego stopnia zapewniają eliminację prawie 99% zanieczyszczeń w ściekach [8].

Ze względu na złożony skład ścieków włókienniczych, najskuteczniejsze są systemy wieloetapowe, np. koagulacja → biologiczne oczyszczanie → AOP (z ang. advanced oxidation processess, zaawansowane procesy utleniania), biologiczne oczyszczanie → AOP → biologiczne oczyszczanie, procesy membranowe + utlenianie elektrochemiczne. Zintegrowane systemy pozwalają na zwiększenie efektywności usuwania zanieczyszczeń, ograniczenie kosztów eksploatacji oraz odzysk wody i surowców [7].

Celem pracy jest dobór optymalnej technologii oczyszczania rzeczywistych ścieków włókienniczych, aby można je było zawrócić do procesów technologicznych.

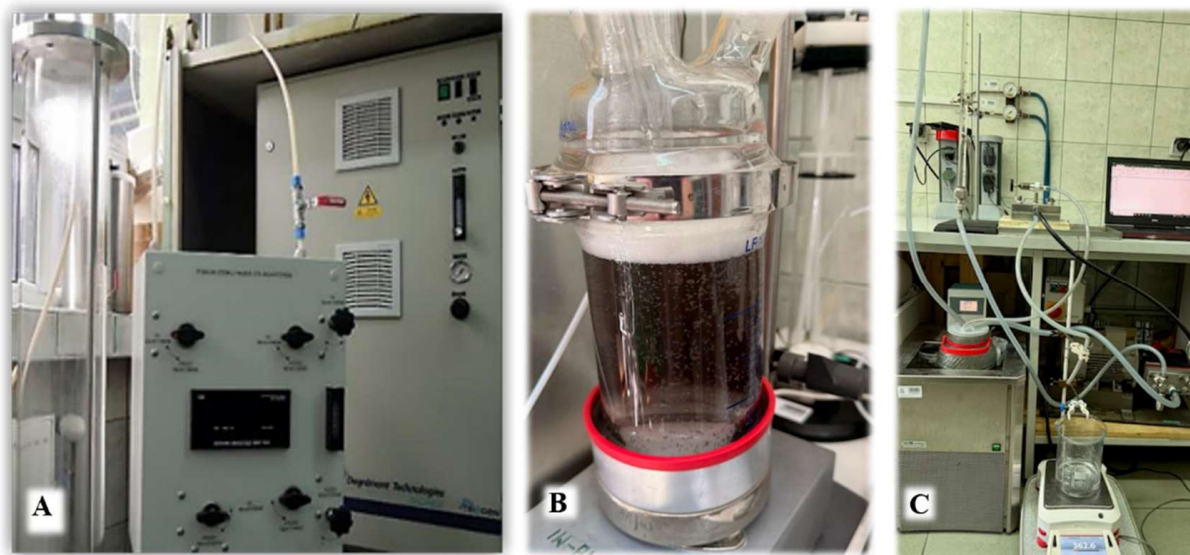
Metodyka

Do badań zastosowano rzeczywiste ścieki włókiennicze pochodzące z przedsiębiorstwa

zlokalizowanego na terenie Polski. Próby ścieków pobierano w odstępach 30 minutowych przez 8 godzin a następnie wymieszano w celu uśrednienia ich składu.

Proces ozonowania ścieków prowadzono w temperaturze pokojowej w dwóch układach reakcyjnych: laboratoryjnym i ćwierć-technicznym. Ozonowanie w skali ćwierć-technicznej prowadzono w szklanej kolumnie o pojemności 20 l połączonej z generatorem ozonu TOGC8X (Degremont Technologies LTD, Dübendorf, Szwajcaria) (Fot. 1A). Pomiar ozonu w mieszaninie tlenowo-ozonowej wykonywano przy zastosowaniu miernika ozonu BMT 964 OG. Ozonowanie w skali laboratoryjnej prowadzono w reaktorze szklanym o pojemności 1 l (Fot. 1B), połączonym z generatorem ozonu BMT 802N. Pomiar ozonu w mieszaninie tlenowo-ozonowej dopływającej do reaktora wykonywany był przy zastosowaniu miernika ozonu BMT 964BT (BMT Messtechnik, Niemcy). Proces nanofiltracji prowadzono przy zastosowaniu metody przepływu krzyżowego ciągłego przy prędkości przepływu wynoszącej 2 l/min i temperaturze 30 °C (Fot. 1C). Proces prowadzono przy ciśnieniu 1.0 MPa. Początkowa objętość ścieków surowych wynosząca 3 l, została załadowana do 1.5 l (1/2). Do badań zastosowano płaską membranę NF HL (GE Osmonics, USA) o powierzchni około 314 cm². Proces koagulacji prowadzono w szklanych zlewkach o pojemności 1 l z zastosowaniem środków NEOFLOC DE23, NEOSORB GS-AN oraz węgla aktywnego (C.H. Erbslöh Polska Sp. z o.o). Koagulację prowadzono w trzech etapach: etap szybkiego mieszania po dodaniu koagulantu NEOFLOC DE23 (1600 obr/min, 30 min), etap wolnego mieszania po dodaniu sorbentu - węgla aktywnego (100 obr/min, 30 minut) oraz etap wolnego mieszania po dodaniu flokulantu NEOSORB GS-AN (100 obr/min, 30 min).

Oznaczenie TOC, ChZT, siarczany, fosforany, azotany, chlorki oraz detergenty anionowe prowadzono przy zastosowaniu odpowiednich testów kuwetowych firmy Hach Lange oraz dedykowanego spektrofotometru DR 3900 Hach Lange.

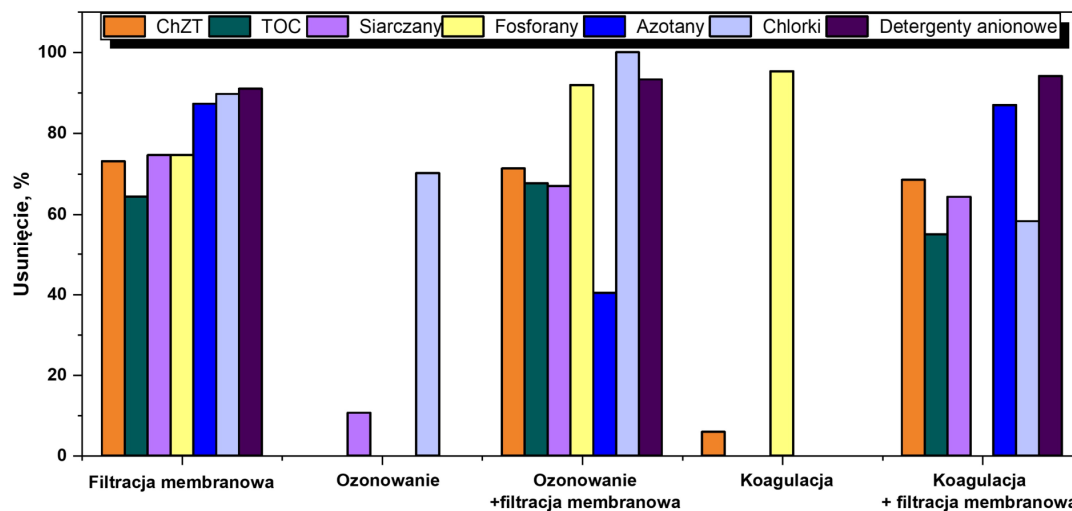


Fot.1. Stanowiska badawcze do oczyszczania ścieków włókienniczych (A, B - stanowiska do ozonowania, C – stanowisko do filtracji membranowej).

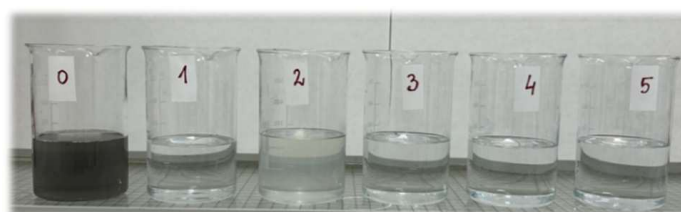
Wyniki i dyskusja

Ścieki surowe charakteryzowały się następującymi parametrami: ChZT 1717 mg/l, TOC 378,0 mg/l, siarczany 73,1 mg/l, fosforany 0,508 mg/l, azotany 0,257 mg/l, chlorki 28,3 mg/l, detergenty anionowe 0,845 mg/l. Stopień usunięcia zanieczyszczeń obecnych w ściekach włókienniczych podczas procesu ich oczyszczania z zastosowaniem różnych metod przedstawiono na rys.1. Natomiast na fotografii 2 przedstawiono zdjęcie ścieków przed i po procesie ich oczyszczania. Rys.2 przedstawia widma spektrofotometryczne ścieków przed i po procesie oczyszczania z zastosowaniem różnych metod. Jak można zauważyć przy zastosowaniu połączenia procesu ozonowania i nanofiltracji usunięto 100% chlorków obecnych w ściekach (Rys.1). Nieco gorsze wyniki usunięcia chlorków (spadek stężenia początkowego około 90%) uzyskano przy zastosowaniu jedynie filtracji membranowej. Natomiast, proces koagulacji nie wpłynął na zmianę stężenia

chlorków. Najlepsze efekty usunięcia fosforanów osiągnięto przy zastosowaniu koagulacji (około 96%) oraz łącznego działania ozonowania i filtracji membranowej. Azotany najefektywniej usuwane były podczas procesu filtracji membranowej oraz podczas łącznego działania koagulacji i filtracji membranowej. Jednakże, biorąc pod uwagę fakt, że sam proces koagulacji nie przyczynił się do zmiany stężenia azotanów to wnioskować można, że azotany usuwane są wyłącznie podczas procesu filtracji membranowej. Podobną sytuację można zaobserwować w przypadku TOC, ChZT i detergentów anionowych. Spadek tych parametrów jest porównywalny dla filtracji membranowej i połączenia tego procesu z ozonowaniem lub koagulacją. Dlatego można przypuszczać, że zastosowanie jedynie filtracji membranowej do oczyszczania badanych ścieków włókienniczych może przyczynić się uzyskania optymalnych parametrów, umożliwiających ich ponowne zastosowanie w procesach technologicznych.

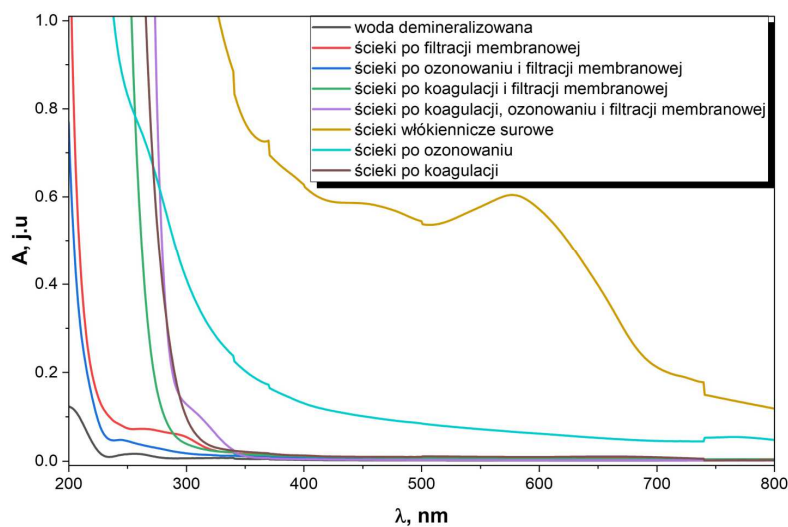


Rys.1. Stopień usunięcia zanieczyszczeń obecnych w ściekach włókienniczych podczas procesu ich oczyszczania z zastosowaniem różnych metod.



- 0 - ścieki włókiennicze surowe
- 1- woda
- 2 - ścieki po ozonowaniu
- 3 - ścieki po filtracji membranowej
- 4 - ścieki po ozonowaniu i filtracji membranowej
- 5 - ścieki po koagulacji i filtracji membranowej

Fot.2 Zdjęcie ścieków przed i po procesie oczyszczania.



Rys.2. Widma spektrofotometryczne ścieków przed i po procesie oczyszczania z zastosowaniem różnych metod.

Wnioski

Oczyszczanie ścieków włókienniczych jest trudnym zagadnieniem, głównie ze względu na obecność w nich związków o niskiej biodegradowalności m.in. barwników, detergentów, środków powierzchniowo czynnych, biocydów i innych substancji polepszających procesy technologiczne i właściwości fizykochemiczne i biologiczne wyrobów tekstylnych.

Na podstawie wyników badań przeprowadzonych na rzeczywistych ściekach włókienniczych można wywnioskować, że zastosowanie filtracji membranowej jako metody oczyszczania ścieków pozwoli na uzyskanie optymalnych parametrów umożliwiających ich ponowne zastosowanie w procesach technologicznych. W przypadku badanych parametrów, zastosowanie ozonowania, koagulacji oraz połączenia procesu filtracji membranowej z ozonowaniem lub koagulacją przynosi odpowiednio gorsze lub porównywalne rezultaty do filtracji membranowej. Niezbędne są jednak, kolejne kroki badawcze mające na celu sprawdzenie możliwości zastosowania oczyszczonych ścieków w procesach technologicznych np. w procesie barwienia, a następnie analizę podstawowych parametrów wyrobów włókienniczych. Pozwoli to na kompleksową ocenę przydatności odzyskanej wody do ponownego wykorzystania w procesach przemysłowych, a w przyszłości może stanowić podstawę do opracowania i wdrożenia rozwiązań umożliwiających zamknięcie obiegów wodnych w zakładach włókienniczych.

Podziękowanie: Praca naukowa dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Nauka dla Społeczeństwa II”: projekt nr NdS-II/SN/0269/2023/01 pt. „Woda, bezcenny surowiec – działania na rzecz jej ochrony”, kwota dofinansowania 994 800,00 zł. Całkowita wartość projektu 994 800,00 zł Termin realizacji projektu: 2023-2026.



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego



Bibliografia

1. KOMUNIKAT KOMISJI DO PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO, RADY EUROPEJSKIEJ, RADY, KOMITETU EKONOMICZNO-SPOŁECZNEGO I KOMITETU REGIONÓW, Europejski Zielony Ład. (n.d.). Komisja Europejska.
2. EUROPEAN PARLIAMENT, (2021). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Pathway to a Healthy Planet for All EU Action Plan: “Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil.”
3. Liu, Y., Zhu, J., Chi, M., Eygen, G. V., Guan, K., & Matsuyama, H. (2025). Comprehensive review of nanofiltration membranes for efficient resource recovery from textile wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 506, 160132. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160132>
4. Azanaw, A., Birlie, B., Teshome, B., & Jemberie, M. (2022). Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100230>
5. Fahad, A., Darwish, M., Ethaib, S., Aris, A., Ali, I. M., Ali, N., & Mustafa, S. (2026). Innovative approaches to textile wastewater treatment: State-of-the-art technologies and future horizons. *Scientific African*, 32, e03341. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2026.e03341>
6. Islam, Md. B., Rahman, A., Hoque, A., & Hossen, Md. A. (2026). Sustainable treatment of textile wastewater using spent tea waste adsorbent: Optimization, isotherm and kinetics modelling. *Cleaner Water*, 6, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.clwat.2026.100267>
7. Espinosa, M., Afonso, C., Saraiva, B., Vione, D., & Fernandes, A. (2026). Textile Wastewater Treatment by Membrane and Electrooxidation Processes: A Critical Review. *Clean Technologies*, 8(1), 9. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol8010009>
8. Quach-Cu, J., Herrera-Lynch, B., Marciniak, C., Adams, S., Simmerman, A., & Reinke, R. (2018). The Effect of Primary, Secondary, and Tertiary Wastewater Treatment Processes on Antibiotic Resistance Gene (ARG) Concentrations in Solid and Dissolved Wastewater Fractions. *Water*, 10 (1), 37. <https://doi.org/10.3390/w10010037>

Artykuł recenzowany

Zastosowanie oczyszczonych ścieków włókienniczych jako medium procesowego w barwieniu wyrobów włókienniczych

Iwona Kucińska-Król ^a, Joanna Olczyk ^a, Magdalena Olak-Kucharczyk ^a,
Anetta Walawska ^a, Martyna Gloc ^{a, b}

a - Sieć Badawcza Łukasiewicz - Łódzki Instytut Technologiczny, Centrum Gospodarki o Obiegu Zamkniętym, ul. Brzezińska 5/15, 92-103 Łódź, Polska

b - Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Katedra Inżynierii Bioprocessowej, ul. Wólczańska 213, 93-005 Łódź, Polska

Abstrakt: Rosnące zapotrzebowanie na wodę oraz zaostrzające się wymagania środowiskowe powodują wzrost zainteresowania technologiami umożliwiającymi odzysk i ponowne wykorzystanie ścieków przemysłowych. Celem pracy była ocena możliwości wykorzystania oczyszczonych ścieków włókienniczych jako medium procesowego w barwieniu tkaniny bawełnianej barwnikami reaktywnymi. W badaniach wykorzystano ścieki oczyszczone metodą ozonowania, filtracji membranowej oraz układami zintegrowanymi obejmującymi ozonowanie i filtrację membranową oraz koagulację i filtrację membranową. Ocenę efektywności procesu przeprowadzono na podstawie stopnia wyczerpania barwnika z kąpieli barwiącej (E), parametrów współrzędnych barwy w przestrzeni CIE-Lab*, całkowitej różnicy barwy (ΔE^*) oraz względnej intensywności wybarwienia (K/S). Dodatkowo określono odporność wybarwień na działanie potu kwaśnego i alkalicznego oraz tarcia suchego i mokrego.

Słowa kluczowe: ścieki włókiennicze, odzysk wody, barwienie tekstyliów, ponowne wykorzystanie ścieków, trwałość wybarwień.

Wstęp

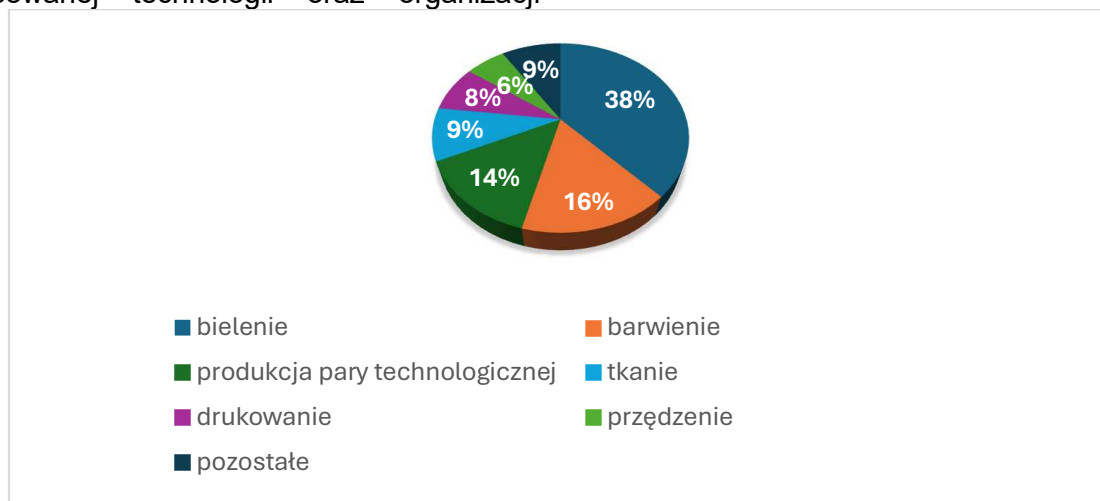
Przemysł włókienniczy należy do sektorów przemysłowych charakteryzujących się bardzo wysokim zapotrzebowaniem na wodę [1-3]. Surowiec ten wykorzystywany jest niemal na każdym etapie produkcji wyrobów włókienniczych, począwszy od procesów przygotowawczych takich jak odklejanie, odłuszczenie i bielenie, poprzez barwienie i drukowanie, aż do procesów

wykończalniczych [3]. Szczególnie wysokie zużycie wody obserwuje się podczas tzw. procesów mokrych, które odpowiadają za zdecydowaną większość całkowitego zapotrzebowania na wodę zakładów włókienniczych. Pozwalają one nadać tekstyliom pożądane właściwości, takie jak kolor, miękkość, a także funkcjonalności, takie jak np. właściwości antybakteryjne, anty-UV, odporność na zabrudzenia i niepalność [4]. Procesy te mogą odpowiadać za ok. 72% całkowitego zużycia wody w przemyśle włókienniczym [5]. Zużycie wody w produkcji tekstyliów jest bardzo zróżnicowane w zależności od prowadzonych procesów, posiadanych urządzeń i stosowanych chemikaliów, wahając się od 50 do 240 l na kg tkaniny [6-7]. Wyprodukowanie jednej tony tekstyliów może wymagać 100–200 tys. litrów wody, z czego 80–90% jest odprowadzane w postaci ścieków [8]. Szacuje się, że w 2015 roku przemysł tekstylny zużył 79 mld m³ wody, a do 2030 roku wartość ta ma wzrosnąć o 50% [9]. Średniej wielkości zakład tekstylny przetwarzający około 8000 kg wyrobów włókienniczych dziennie potrzebuje około 1,6 miliona litrów wody [10]. Choć przytoczone dane pochodzą sprzed ponad dekady, najnowsze analizy wskazują, że zużycie wody w przemyśle włókienniczym utrzymuje się na zbliżonym, a w niektórych przypadkach nawet wyższym poziomie, co jest związane z dominującym udziałem procesów barwienia i wykańczania, charakteryzujących się wysoką wodochłonnością [11-12]. Procesy mokre generują ścieki zawierające m.in. barwniki, środki powierzchniowo czynne, sole nieorganiczne oraz substancje pomocnicze stosowane w procesach produkcyjnych [2,3]. Szacuje się, że około 80–90% wody zużywanej podczas produkcji wyrobów

włókienniczych trafia do strumieni ścieków wymagających oczyszczenia przed odprowadzeniem do środowiska [13].

Jednocześnie udział poszczególnych procesów w całkowitym zużyciu wody może znacząco różnić się w zależności od profilu produkcji, rodzaju przetwarzanego materiału, stosowanej technologii oraz organizacji

procesu technologicznego w danym zakładzie [9,14]. Przykładowo, według danych przedstawionych przez Kanta [10], proces barwienia odpowiada za około 16% całkowitego zużycia wody w analizowanym zakładzie włókienniczym (Rys. 1).



Rys. 1. Struktura zużycia wody w procesach przemysłu włókienniczego [10]

W zależności od rodzaju barwnika (np. reaktywny, kadziowy, dyspersyjny) i podłoża (np. bawełna, poliestr lub mieszanki), w procesie barwienia zużywa się od 30 do 150 litrów na kilogram tkaniny. Absorpcja barwnika jest również wspomagana przez pomocnicze środki chemiczne [3,15]. Stwierdzono, że procesy barwienia i wykańczania tekstyliów odpowiadają za około 17–20% globalnego zanieczyszczenia wód przemysłowych, stanowiąc jedno z głównych źródeł presji środowiskowej związanej z sektorem włókienniczym [12,16]. W połączeniu z wysokim zużyciem wody charakterystycznym dla procesów włókienniczych powoduje to rosnące zainteresowanie technologiami umożliwiającymi ograniczenie poboru świeżej wody oraz odzysk i ponowne wykorzystanie ścieków oczyszczonych. Jednym z kierunków działań jest zastosowanie odpowiednio oczyszczonych ścieków włókienniczych w kolejnych etapach procesu produkcyjnego, co wpisuje się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym oraz zrównoważonego

gospodarowania zasobami wodnymi. Warunkiem skutecznego wdrożenia tego typu rozwiązań jest uzyskanie ścieków oczyszczonych o parametrach umożliwiających ich ponowne wykorzystanie bez pogorszenia jakości wyrobów końcowych. Szczególne znaczenie ma to w procesach barwienia, gdzie jakość wody może wpływać na przebieg procesu, intensywność wybarwienia oraz trwałość uzyskanych efektów kolorystycznych. W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących wykorzystania oczyszczonych ścieków włókienniczych jako medium procesowego w procesie barwienia materiału włókienniczego.

Metodyka

W badaniach wykorzystano rzeczywiste ścieki włókiennicze pobrane z zakładu przemysłu włókienniczego zlokalizowanego na terenie Polski. Charakteryzowały się one następującymi parametrami: ChZT 1717 mg/l, TOC 378,0 mg/l, siarczany 73,1 mg/l, fosforany 0,508 mg/l, azotany 0,257 mg/l, chlorki 28,3 mg/l, detergenty anionowe 0,845 mg/l. Ścieki te poddano oczyszczaniu z zastosowaniem różnych konfiguracji

technologicznych obejmujących procesy ozonowania, koagulacji oraz filtracji membranowej, realizowane zarówno jako procesy jednostkowe, jak i układy zintegrowane. Szczegółową charakterystykę ścieków przed i po procesach oczyszczania przedstawiono w publikacji „Odzysk wody w przemyśle włókienniczym – dobór optymalnej technologii oczyszczania ścieków włókienniczych” [17].

Oczyszczone ścieki wykorzystano jako medium procesowe do przygotowania kąpeli barwiących. Badaniom poddano tkaninę bawełnianą 100% o splocie skośnym i gramaturze 260 g/m², którą barwiono reaktywnym barwnikiem Drimaren Ultimate Blue HD M0100 (Archroma) w intensywności 0,1% i 0,5%. Do kąpeli barwiącej dodawano sól oraz sodę kalcynowaną zgodnie z wymaganiami procesu barwienia barwnikami reaktywnymi. Proces prowadzono w temperaturze 60°C przez 100 minut, moduł kąpeli wynosił 10:1.

Jako materiał referencyjny przyjęto próbki wybarwione w kąpeli barwiącej z wykorzystaniem wody demineralizowanej.

Ocenę jakości uzyskanych wybarwień przeprowadzono metodą barwometryczną. Współrzędne barwy CIEL*a*b* wyznaczono zgodnie z normą PN-EN ISO 105-J01:2001 „Tekstylna – Badania odporności wybarwień – Część J01: Ogólne zasady pomiaru barwy powierzchni”, przy użyciu spektrofotometru Datacolor 850 (Datacolor International, USA) o geometrii pomiarowej d/8. Pomiar wykonano przy standardowym źródle światła D65 oraz dla obserwatora standardowego 10°, stosując duże okno pomiarowe.

Na podstawie wyników pomiarów spektrofotometrycznych wyznaczono względną intensywność wybarwienia K/S (współczynnik Kubelki-Munka) oraz całkowitą różnicę barwy ΔE^* . Wartości K/S obliczono dla długości fali odpowiadającej maksimum absorpcji badanego barwnika ($\lambda_{\max}$). Współczynnik intensywności wybarwienia K/S obliczono na podstawie współczynnika odbicia światła (R) zgodnie z równaniem (1):

$$K/S = \frac{(1 - R)^2}{2R}$$

gdzie:

K - współczynnik absorpcji światła,

S - współczynnik rozpraszania światła,
R - współczynnik odbicia światła dla danej długości fali.

Całkowitą różnicę barwy ΔE^* wyznaczono na podstawie współrzędnych barwy CIEL*a*b* zgodnie z normą PN-EN ISO 105-J03:2000 „Tekstylna – Badania trwałości wybarwień – Część J03: Obliczanie różnic barwy”, według równania (2):

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

gdzie:

DL* - różnica w jasności,

Da* - różnica na osi zielony-czerwony,

Db* - różnica na osi niebieski-żółty.

Wartość ΔE^* stanowi miarę całkowitej różnicy barwy pomiędzy próbką badaną a próbką referencyjną.

Wpływ zastosowania oczyszczonych ścieków na proces barwienia oceniono poprzez porównanie wartości K/S oraz ΔE^* uzyskanych dla próbek barwionych z wykorzystaniem oczyszczonych ścieków i próbek referencyjnych barwionych z użyciem wody demineralizowanej.

Dodatkowo wyznaczono stopień wyczerpania barwnika z kąpeli barwiącej E [%], określający procentowy udział barwnika zaadsorbowanego przez materiał podczas procesu barwienia w odniesieniu do jego początkowej ilości w kąpeli. Parametr ten obliczono na podstawie zmian absorbancji kąpeli barwiącej przed i po procesie barwienia, zgodnie z równaniem (3), przyjmując proporcjonalność absorbancji do stężenia wynikającą z prawa Lamberta-Beera:

$$E [\%] = \frac{A_0 - A_1}{A_0} * 100$$

gdzie:

A₀ - absorbancja kąpeli barwiącej przed rozpoczęciem procesu barwienia,

A₁ - absorbancja kąpeli barwiącej po zakończeniu procesu barwienia.

Pomiar absorbancji wykonywano na spektrofotometrze UV VIS Jasco V 600.

Uzyskane wartości E [%] wykorzystano do oceny efektywności procesu barwienia

przewodzonego z zastosowaniem oczyszczonych ścieków oraz wody demineralizowanej. Trwałość uzyskanych wybarwień oceniono zgodnie z wymaganiami norm serii PN-EN ISO 105. Zakres badań obejmował ocenę trwałości wybarwień na tarcie suche i mokre zgodnie z PN-EN ISO 105-X12:2016-08 „Tekstylna – Badania odporności wybarwień – Część X12: Odporność wybarwień na tarcie” oraz ocenę odporności wybarwień na działanie potu kwaśnego i alkalicznego zgodnie z PN-EN ISO 105-E04 „Tekstylna – Badania odporności wybarwień – Część E04: Odporność wybarwień na pot”.

Tab. 1. Wyniki pomiarów barwometrycznych oraz stopień wyczerpania barwnika dla procesu barwienia tkaniny bawełnianej przy zastosowaniu wody demineralizowanej i oczyszczonych ścieków.

L.p.	Rodzaj kąpiel barwiącej / stężenie barwnika w kąpiel	Stopień wyczerpania barwnika z kąpeli, E [%]	Współrzędne barwy					Całkowita różnica barwy	Względna intensywność wybarwień
			L*	a*	b*	C*	h		
1	Woda demineralizowana 0,1%	91	73,62	-6,17	-14,21	15,49	246,51	-	0,1584
2	Woda demineralizowana 0,5%	86	56,90	-8,39	-21,78	23,34	248,93	-	0,5060
3	Ścieki po ozonowaniu 0,1%	83	74,84	-6,03	-13,80	15,06	246,39	1,29	0,1397
4	Ścieki po ozonowaniu 0,5%	87	56,47	-8,48	-22,05	23,63	248,96	0,52	0,5190
5	Ścieki po filtracji membranowej 0,1%	90	74,89	-6,13	-13,77	15,07	246,00	1,34	0,1405
6	Ścieki po filtracji membranowej 0,5%	91	55,78	-8,46	-22,07	23,64	249,02	1,16	0,5505
7	Ścieki po ozonowaniu i filtracji membranowej 0,1%	91	73,37	-6,41	-14,76	16,09	246,53	0,65	0,1579
8	Ścieki po ozonowaniu i filtracji membranowej 0,5%	92	55,64	-8,71	-22,64	24,25	248,95	1,50	0,5359
9	Ścieki po koagulacji i filtracji membranowej 0,1%	85	74,29	-6,12	-13,96	15,25	246,32	0,71	0,1464
10	Ścieki po koagulacji i filtracji membranowej 0,5%	89	56,50	-8,30	-22,00	23,51	249,33	0,46	0,5180

L* odpowiada jasności, C* odpowiada nasyceniu (chroma), h odpowiada kątowi barwy – od cieniowi, a* reprezentuje barwy od zieleni (-a) do czerwieni (+a), b* reprezentuje barwy od niebieskiego (-b) do żółtego (+b),

Wyniki i dyskusja

W celu oceny wpływu zastosowania oczyszczonych ścieków na efektywność procesu barwienia tkaniny bawełnianej przeprowadzono pomiary barwometryczne oraz wyznaczono stopień wyczerpania barwnika z kąpeli barwiącej. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 1. Analizie poddano względną intensywność wybarwienia K/S, całkowitą różnicę barwy ΔE^* oraz stopień wyczerpania barwnika E [%] dla próbek barwionych z wykorzystaniem wody demineralizowanej i oczyszczonych ścieków.

Uzyskane wyniki (Tab. 1) wskazują, że zastosowanie oczyszczonych ścieków jako medium procesowego nie wpłynęło istotnie na przebieg procesu barwienia ani jakość uzyskanych wybarwień w porównaniu z próbkami referencyjnymi barwionymi z wykorzystaniem wody demineralizowanej.

Dla wszystkich analizowanych wariantów procesu barwienia stopień wyczerpania barwnika E osiągnął wysokie wartości, mieszczące się w zakresie od 83 do 92%. W przypadku kąpieli przygotowanych na bazie wody demineralizowanej stopień wyczerpania wynosił odpowiednio 91% dla stężenia barwnika 0,1% oraz 86% dla stężenia 0,5%. Natomiast w przypadku kąpieli z wykorzystaniem ścieków oczyszczonych wyniki wskazują, że najwyższe wartości E uzyskano dla ścieków po ozonowaniu i filtracji membranowej odpowiednio 91 i 92% oraz po filtracji membranowej 90 i 91%. Stopień wyczerpania barwnika z kąpieli barwiącej w przypadku barwienia wykonanego przy użyciu ścieków poddanych filtracji membranowej oraz ozonowaniu i filtracji membranowej jest porównywalny, a dla stężenia barwnika w kąpieli 0,5% dla wszystkich wariantów jest porównywalny lub wyższy w porównaniu do stopnia wyczerpania barwnika z procesu barwienia z zastosowaniem wody demineralizowanej.

Współrzędne barwy CIEL^{*}a^{*}b^{*} dla próbek barwionych z wykorzystaniem oczyszczonych ścieków są zbliżone do wartości uzyskanych dla próbek referencyjnych. Dla wszystkich wariantów zaobserwowano zbliżone wartości parametrów L^{*}, a^{*}, b^{*}, C^{*}, h, co świadczy o zachowaniu porównywalnego odcienia i nasycenia barwy niezależnie od zastosowanego medium procesowego.

Względna intensywność wybarwienia K/S próbek tkanin barwionych z użyciem ścieków poddanych ozonowaniu i filtracji membranowej (0,1579) dla stężenia barwnika w kąpieli 0,1%, jest najbardziej zbliżona do intensywności wybarwienia (0,1584) próbek tkanin barwionych z użyciem wody demineralizowanej.

Przy stężeniu barwnika 0,5% nie stwierdzono istotnych różnic wartości K/S pomiędzy próbkami barwionymi z wykorzystaniem wody

demineralizowanej i oczyszczonych ścieków (Tab. 1 poz. 2, 4, 6, 8, 10).

Całkowita różnica barwy ΔE^* względem próbek referencyjnych mieści się w zakresie od 0,46 do 1,50. Najniższą wartość ΔE^* odnotowano dla próbek barwionych z wykorzystaniem ścieków po koagulacji i filtracji membranowej przy stężeniu barwnika 0,5% ($\Delta E^* = 0,46$) oraz ścieków po ozonowaniu przy tym samym stężeniu barwnika ($\Delta E^* = 0,52$). Najwyższą wartość ΔE^* (1,50) uzyskano dla ścieków po ozonowaniu i filtracji membranowej przy stężeniu barwnika 0,5%. Niskie wartości ΔE^* wskazują na bardzo dobrą zgodność kolorystyczną próbek barwionych z wykorzystaniem oczyszczonych ścieków względem próbek referencyjnych.

Uzyskane wyniki wskazują, że ścieki poddane ozonowaniu, filtracji membranowej oraz układom zintegrowanym mogą być wykorzystane jako medium procesowe w procesie barwienia tkanin bawełnianych bez istotnego pogorszenia efektywności sorpcji barwnika na tkaninę oraz względnej intensywności wybarwienia.

Przeprowadzono również wizualną ocenę wybarwień uzyskanych przy zastosowaniu różnych mediów procesowych. Fotografia 1 przedstawia próbki tkanin bawełnianych po procesie barwienia z wykorzystaniem wody demineralizowanej oraz oczyszczonych ścieków, dla warunków procesu zestawionych w tabeli 1.



Fot. 1. Zdjęcie tkanin bawełnianych po procesie barwienia przy zastosowaniu wody demineralizowanej i oczyszczonych ścieków (próbka nr 1 i nr 2 - próbki referencyjne wybarwione na wodzie demineralizowanej, próbki 3-10 - wybarwione na oczyszczonych ściekach. Warunki barwienia podano w Tab. 1.)

Istotnym elementem oceny przydatności oczyszczonych ścieków do zastosowania w procesach barwienia jest określenie trwałości uzyskanych wybarwień. W tym celu przeprowadzono badania odporności wybarwień na

działanie potu kwaśnego i alkalicznego oraz tarcia suchego i mokrego dla próbek barwionych z wykorzystaniem oczyszczonych ścieków oraz wody demineralizowanej przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wyniki badań trwałości wybarwień materiałów barwionych z wykorzystaniem oczyszczonych ścieków oraz wody demineralizowanej na działanie potu kwaśnego i alkalicznego oraz tarcia suchego i mokrego

L. p	Rodzaj kąpieli barwiącej / stężenie barwnika w kąpieli	Pot kwaśny			Pot alkaliczny			Tarcie suche		Tarcie mokre	
		próbka ^a	ba-weł-na ^b	weł-na ^c	próbka ^a	ba-weł-na ^b	weł-na ^c	kierunek wzdłużny ^d	kierunek poprzeczny ^d	kierunek wzdłużny ^d	kierunek poprzeczny ^d
1	Woda demineralizowana 0,1%	5	4-5	4-5	5	5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
2	Woda demineralizowana 0,5%	5	4-5	4-5	5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
3	Ścieki po ozonowaniu 0,1%	5	5	4-5	5	5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
4	Ścieki po ozonowaniu 0,5%	5	4-5	4-5	5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
5	Ścieki po filtracji membranowej 0,1%	5	5	4-5	5	5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
6	Ścieki po filtracji membranowej 0,5%	5	4-5	4-5	5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
7	Ścieki po ozonowaniu i filtracji membranowej 0,1%	5	5	5	5	5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
8	Ścieki po ozonowaniu i filtracji membranowej 0,5%	5	4-5	4-5	5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5
9	Ścieki po koagulacji i filtracji membranowej 0,1%	5	4-5	5	5	4-5	5	4-5	4-5	4-5	4-5
10	Ścieki po koagulacji i filtracji membranowej 0,5%	5	4	4-5	5	4	4-5	4-5	4-5	4-5	4-5

- 1) Wskaźnik odporności wybarwień wg szarej skali, w której wskaźnik „5” oznacza brak zmiany barwy próbki i brak zabrudzenia bieli tkaniny towarzyszącej, a wskaźnik „1” zmianę bardzo dużą.
 - a) Zmiana barwy danej próbki
 - b) Zabrudzenie bieli tkaniny towarzyszącej – bawełna
 - c) Zabrudzenie bieli towarzyszącej – wełna
 - d) Zabrudzenie bieli bawełnianej tkaniny
 - e) trącej

Wyniki badań trwałości wybarwień przedstawione w Tabeli 2 wskazują, że wszystkie analizowane próbki charakteryzowały się bardzo dobrą odpornością na działanie potu kwaśnego i alkalicznego oraz na tarcie suche i mokre. Uzyskane oceny mieściły się w zakresie od 4 do 5 stopni według szarej skali. W większości prób było to ocena 4,5 i 5, co świadczy o wysokiej trwałości wybarwień oraz braku skłonności do zmiany barwy i zabrudzania tkanin towarzyszących. Najniższą ocenę (4 stopnie) odnotowano dla próbki barwionej z wykorzystaniem ścieków po koagulacji i filtracji membranowej przy stężeniu barwnika 0,5% (próbka 10) w zakresie zabrudzenia bawełny podczas badań odporności na działanie potu kwaśnego i alkalicznego. Wynik ten nadal odpowiada dobrej trwałości wybarwienia. Zastosowanie oczyszczonych ścieków, niezależnie od zastosowanej technologii oczyszczania (ozonowanie, filtracja membranowa, ozonowanie i filtracja membranowa oraz koagulacja i filtracja membranowa), nie powodowało pogorszenia trwałości wybarwień w porównaniu z próbkami referencyjnymi barwionymi z wykorzystaniem wody demineralizowanej. Dla wszystkich analizowanych wariantów uzyskano porównywalne wyniki odporności zarówno na działanie potu kwaśnego i alkalicznego, jak i na tarcie suche oraz mokre. Nie stwierdzono również istotnego wpływu stężenia barwnika w kąpeli (0,1% i 0,5%) na trwałość uzyskanych wybarwień. Dla obu analizowanych stężeń uzyskano zbliżone oceny odporności na badane czynniki.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że ścieki włókiennicze poddane procesom oczyszczania mogą być wykorzystywane jako medium procesowe w barwieniu tkanin bawełnianych bez pogorszenia trwałości

wybarwień oraz właściwości użytkowych otrzymanych materiałów.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość wykorzystania oczyszczonych ścieków włókienniczych jako medium procesowego w procesie barwienia tkanin bawełnianych barwnikami reaktywnymi. Niezależnie od zastosowanej konfiguracji technologicznej oczyszczania ścieków uzyskano wysokie wartości stopnia wyczerpania barwnika z kąpeli barwiącej, mieszczące się w zakresie 83–92%, porównywalne lub wyższe od wartości uzyskanych dla próbek referencyjnych barwionych z wykorzystaniem wody demineralizowanej.

Analiza pomiarów barwometrycznych wykazała niewielkie różnice pomiędzy próbkami barwionymi z wykorzystaniem oczyszczonych ścieków i próbkami referencyjnymi. Wartości współczynnika intensywności wybarwienia K/S oraz współrzędnych barwy CIEL*a*b* były zbliżone dla wszystkich badanych wariantów. Całkowita różnica barwy ΔE^* nie przekraczała 1,50, co wskazuje na dobrą zgodność kolorystyczną wybarwień uzyskanych przy zastosowaniu oczyszczonych ścieków względem próbek referencyjnych.

Badania trwałości wybarwień wykazały bardzo dobrą odporność wybarwień na działanie potu kwaśnego i alkalicznego oraz tarcia suchego i mokrego. Uzyskane oceny mieściły się na poziomie 5 i 4,5 stopni wg. szarej skali, co potwierdza wysoką jakość użytkową wybarwionych materiałów. Nie stwierdzono istotnego wpływu rodzaju zastosowanego medium procesowego na trwałość uzyskanych wybarwień.

Uzyskane wyniki wskazują, że ścieki podane procesom ozonowania, filtracji membranowej bądź oczyszczaniu z wykorzystaniem układów zintegrowanych (obejmujących ozonowanie i filtrację membranową oraz koagulację i filtrację membranową) mogą stanowić alternatywę dla wody demineralizowanej w procesach barwienia wyrobów włókienniczych. Zastosowanie oczyszczonych ścieków umożliwi ograniczenie zużycia świeżej wody bez pogorszenia efektywności procesu barwienia, jakości wybarwień oraz ich właściwości użytkowych, wpisując się tym samym w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym oraz zrównoważonego gospodarowania zasobami wodnymi.

Podziękowanie: Praca naukowa dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Nauka dla Społeczeństwa II”: projekt nr NdS-II/SN/0269/2023/01 pt. „Woda, bezcenny surowiec – działania na rzecz jej ochrony”, kwota dofinansowania 994 800,00 zł. Całkowita wartość projektu 994 800,00 zł
Termin realizacji projektu: 2023-2026.



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego



Bibliografia

1. N. Thombre, P. Patil, A. Yadav, A. Patwardhan, "A short review on water management and reuse in textile industry – a sustainable approach", *Discov. Water*, vol. 5, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s43832-025-00215-z.
2. A. Pundir et al., "Innovations in textile wastewater management: a review of zero liquid discharge technology", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, no. 9, pp. 12597–12616, 2024, doi: 10.1007/s11356-024-31827-y.
3. D. A. Yaseen, M. Scholz, "Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review", *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 1193–1226, Feb. 04, 2019, doi: 10.1007/s13762-018-2130-z.
4. S. Eyupoglu, N. Merdan, "Eco-Friendly Production Methods in Textile Wet Processes" w *Sustainable Innovations in Textile Chemical Processes*; Springer Nature Singapore Pte Ltd.: Singapore, 2018; pp. 31–65.
5. M. L. Catarino, F. Sampaio, A. L. Gonçalves, "Sustainable Wet Processing Technologies for the Textile Industry: A Comprehensive Review," *Sustain.*, vol. 17, no. 7, pp. 1–33, 2025, doi: 10.3390/su17073041.
6. I. Holme, "Sir William Henry Perkin: A Review of His Life, Work and Legacy. *Color. Technol.*," 2006, 122, 235–251."
7. M. Marcucci, G. Nosenzo, G. Capannelli, I. Ciabatti, D. Corrieri, G. Ciardelli, "Treatment and reuse of textile effluents based on new ultrafiltration and other membrane technologies," *Desalination*, vol. 138, no. 1–3, pp. 75–82, Sep. 2001, doi: 10.1016/S0011-9164(01)00247-8.
8. Y. Liu, J. Zhu, M. S. Chi, G. Van Eygen, K. Guan, and H. Matsuyama, "Comprehensive review of nanofiltration membranes for efficient resource recovery from textile wastewater," *Chem. Eng. J.*, vol. 506, no. December 2024, p. 160132, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.160132.
9. J. Eder-Hansen et al., "Pulse of the fashion industry", Report of the Global Fashion Agenda. 2017. Available online: https://www.greylock-glass.com/wp-content/uploads/2021/08/Pulse-of-the-Fashion-Industry_2017.pdf.
10. R. Kant, "Textile dyeing industry an environmental hazard," *Nat. Sci.*, vol. 04, no. 01, pp. 22–26, 2012, doi: 10.4236/ns.2012.41004.
11. Y. Liu, J. Zhu, M. S. Chi, G. Van Eygen, K. Guan, H. Matsuyama, "Comprehensive review of nanofiltration membranes for efficient resource recovery from textile wastewater," *Chemical Engineering Journal*, vol. 506, Elsevier B.V., Jan. 15, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.160132.
12. A. Azanaw, B. Birlie, B. Teshome, M. Jemberie, "Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 6, p. 100230, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.CSCEE.2022.100230.
13. M. Espinosa, C. Afonso, B. Saraiva, D. Vione, A. Fernandes, "Textile Wastewater Treatment by Membrane and Electrooxidation Processes: A Critical Review," *Clean Technol.*, vol. 8, no. 1, p. 9, Jan. 2026, doi: 10.3390/cleantechnol8010009.
14. C. Frazier, C.; Grant, S.; Johnson, L.; McGee, K.; Powell, "Water Efficiency Manual for Commercial, Industrial and Institutional Facilities", 2009.
15. L. Ammayappan, S. Jose, A. Arputha Raj, "Sustainable production processes in textile dyeing," in *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes*, Springer, 2016, pp. 185–216. Doi: 10.1007/978-981-10-0111-6_eight.
16. J. Sharma, S. Sharma, and V. Soni, "Classification and impact of synthetic textile dyes on Aquatic Flora: A review," *Reg. Stud. Mar. Sci.*, vol. 45, p. 101802, 2021, doi: 10.1016/J.RSMA.2021.101802.
17. M. Olak-Kucharczyk., M. Głoc, I. Kucińska – Król, J. Olczyk, A. Walawska, R. Żyła, "Odzysk wody w przemyśle włókienniczym - dobór optymalnej technologii oczyszczania ścieków włókienniczych", In: *Informator Chemika Kolorysty nr 47*, 2026, Wydawnictwo: Fundacji Rozwoju Polskiej Kolorystyki.

Artykuł recenzowany

Teoria barwienia – teoria, która wciąż powstaje, ale bardzo wolno. Część IV

„Transport barwnika z kąpeli do powierzchni włókna – znaczenie przepływu i warstwy granicznej”

Zenon Grabarczyk

Stowarzyszenie Polskich Chemików Kolorystów

Z punktu widzenia inżynierii chemicznej barwienie i drukowanie to nic innego jak zjawisko transportu masy barwnika z kąpeli barwiącej czy pasty drukarskiej do wnętrza włókna. Aby opisać ten proces musimy podzielić go na etapy i każdy z nich opisać innymi równaniami, odpowiednimi dla procesów fizykochemicznych decydujących o nim. Pierwszym etapem tego procesu jest:

transport barwnika z kąpeli do powierzchni włókna,

Etap ten rozpoczyna się od obróbki barwionego materiału kąpielą zawierającą środki pomocnicze takie jak, regulatory pH, elektrolity, środki zwilżające i inne środki powierzchniowo czynne. Konkretny skład kąpeli barwiącej uzależniony jest od rodzaju barwionych włókien i barwników użytych do procesu.

W trakcie kilku minut obróbki „ślepią kąpielą barwiącą”, zachodzą istotne procesy fizykochemiczne związane z uwodnieniem włókna oraz kształtowaniem się warstwy międzyfazowej na granicy włókno – kąpiel. Po dodaniu roztworu barwnika, w kolejnych minutach następuje obróbka pełną już kąpielą. W tym czasie ruch płynu lub materiału barwionego albo tych dwóch czynników jednocześnie, powoduje wyrównanie stężenia barwnika w całej objętości. Kolejne minuty procesu to krążenie stopniowo podgrzewanej kąpeli w czasie, którym następuje transport barwnika do powierzchni włókna.

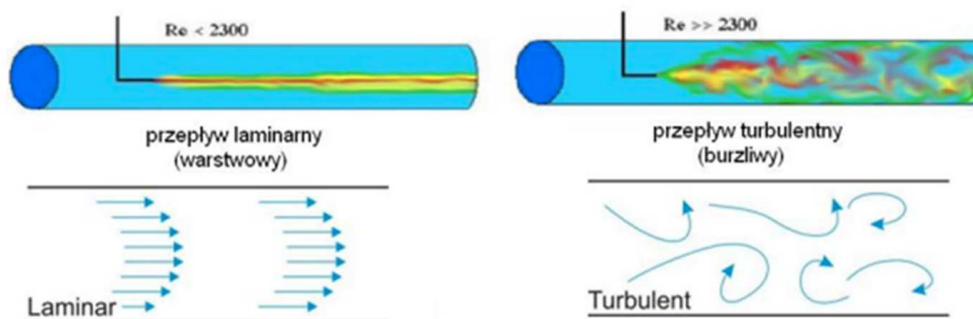
Transport barwnika w poruszającej się cieczy zachodzi na skutek **dyfuzji molekularnej** oraz **konwekcji**. Łączny efekt obu procesów określa się mianem transportu lub **dyfuzji konwekcyjnej**.

Dyfuzja molekularna polega na dążeniu układu do wyrównania stężenia w wyniku chaotycznego ruchu cząsteczek barwnika w kąpeli j. Cząsteczki przemieszczają się z obszarów o większym stężeniu do obszarów, gdzie stężenie jest mniejsze.

W rzeczywistych warunkach barwienia kąpiel barwiąca nie jest statyczna, ale podlega wymuszonemu ruchowi. Najczęściej ruch kąpeli wymuszają pompy aparatu barwiącego lub ruch płynu kąpeli jest skoordynowany z ruchem materiału barwionego. Cząsteczki barwnika przemieszczają się konwekcyjnie, unoszone są z kąpielą oraz jednocześnie podlegają dyfuzji molekularnej. Suma działania tych dwóch procesów nosi nazwę **dyfuzji konwekcyjnej**.

W zależności od konstrukcji barwiarki i formy barwionego materiału, przepływ kąpeli może być laminarny lub turbulentny.

W przepływie laminarnym kąpiel barwiąca składa się jakby z szeregu warstw, a cząsteczki barwnika poruszają się w jednym kierunku zgodnie z ruchem kąpeli. W przeciwieństwie do tego ruchu, przepływ turbulentny jest chaotyczny, nieregularny z występowaniem gwałtownych wirów. Burzliwość przepływu wywołuje gwałtowne mieszanie się barwnika. W skali całego aparatu przepływ jest zwykle turbulentny, choć lokalnie przy powierzchni materiału może mieć charakter laminarny.

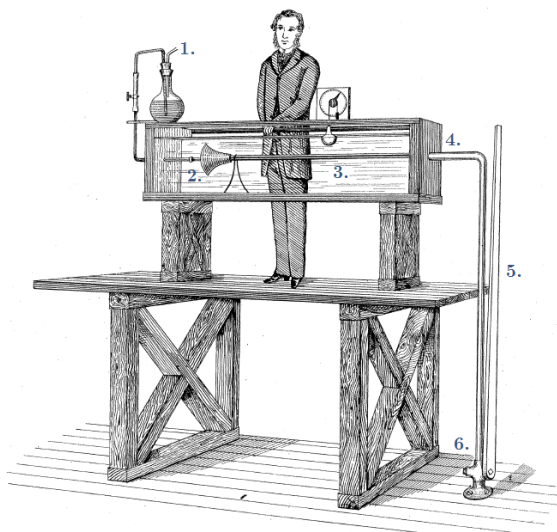


Rys. 1. Przepływ laminarny i turbulentny

Parametrem pozwalającym odróżnić przepływ laminarny od turbulentnego jest bezwymiarowe kryterium, stworzone przez Osbornę **Reynoldsa** i nazwane na jego cześć; tzw. liczba Reynoldsa **Re**.

Osborne Reynolds swoje doświadczenia na temat przepływu cieczy opisał w pracy: An Experimental Investigation of the

Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall Be Direct or Sinuous, and of the Law of Resistance in Parallel Channels* (Eksperymentalne badanie okoliczności decydujących o tym, czy ruch wody będzie prosty czy kręty, oraz prawa oporu w kanałach równoległych) Proceedings of the Royal Society of London. 35 (224–226): 84–99. 1883.



Rys. 2. Stanowisko doświadczalne Reynoldsa

Liczba Reynoldsa **Re** jest wielkością bezwymiarową, pozwala porównywać ze sobą zachowanie się różnych obiektów w różnych cieczach. Jeśli mimo różnic, mają one tę samą liczbę Reynoldsa, to ich zachowanie się będzie podobne, a wzory opisujące pod wieloma względami identyczne. Charakter przepływu płynów określa kryterium nazywane liczbą Reynoldsa, którą oblicza się ze

wzoru:
$$Re = \frac{Ul\rho}{\eta} = \frac{Ul}{\nu}$$

gdzie:

- ρ – gęstość medium [kg/m^3],
- U – prędkość przepływu [m/s],
- d – średnica wewnętrzna przewodu [m],
- η – lepkość dynamiczna medium [$\text{Pa}\cdot\text{s}$],
- ν – lepkość kinematyczna [m^2/s].

Jeżeli nie jest to przewód kołowy do wzoru wstawiamy średnicę zastępczą, którą obliczamy ze wzoru $d = d_z = 4 (S/O)$. Czyli jest to czterokrotność iloraz pola przekroju poprzecznego S i obwodu zwilżanego kanału O .

Przepływ laminarny $Re < 2300$

Cząsteczki płynu poruszają się w równoległych warstwach, które się nie mieszają. Ruch jest uporządkowany, płynny i stabilny. Przepływ przejściowy $2300 > Re < 4000$: Stan niestabilny, w którym przepływ może przyjmując charakterystykę laminarną lub turbulentną, zależnie od dodatkowych czynników (np. chropowatości ścianek rury czy wstrząsów).

Przepływ turbulentny $Re > 4000$:

Ruch jest chaotyczny i nieregularny. Cząsteczki płynu gwałtownie się mieszają, tworząc tzw. wiry, co drastycznie zwiększa opory przepływu

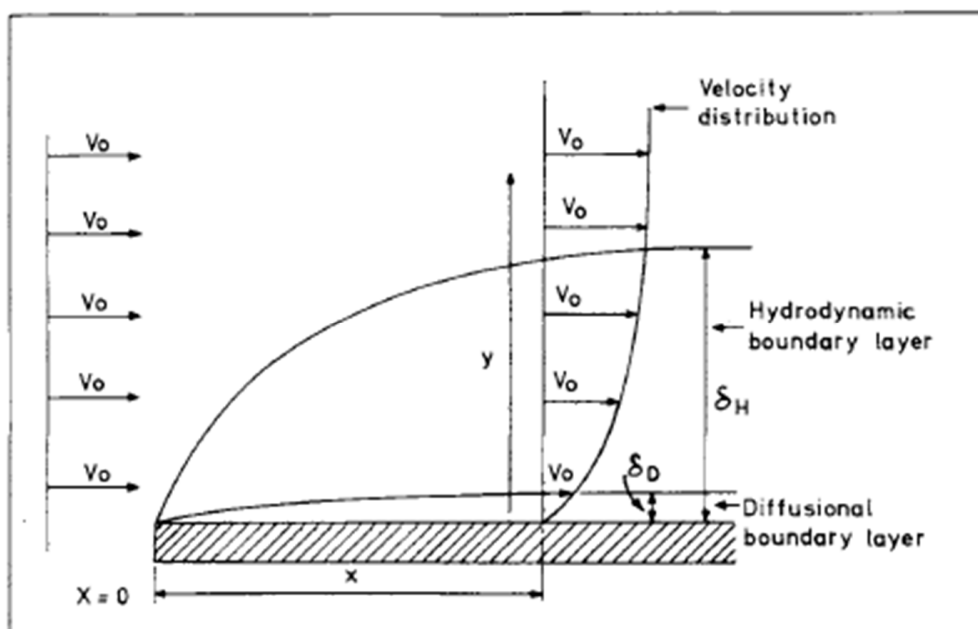
W pobliżu powierzchni włókna tworzy się hydrodynamiczna warstwa graniczna, w której prędkość przepływu maleje do zera, oraz zawarta w niej cieńsza dyfuzyjna warstwa graniczna, w której występuje gradient stężenia barwnika. Wyhamowanie ruchu cieczy zachodzi wskutek sił lepkości, które są nieistotne w pozostałej objętości przepływającej cieczy.

Ponieważ przepływ kropli w warunkach przemysłowego barwienia jest skomplikowany, zjawisko przepływów analizowano w oparciu o proste modele. Podstawą tych modeli stały się badania jak barwnik jest wchłaniany przez arkusze folii zanurzonych w kropli barwiącej i jaki wpływ ma na to konwekcyjny i dyfuzyjny transport masy.

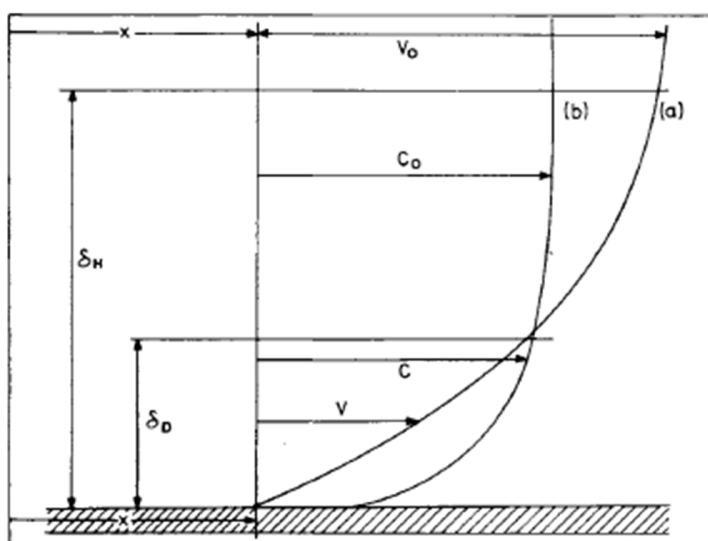
Z reguły były to badania wzorowane na badaniach Levitcha (*radziecki uczonec, który swoje badania opisał w książce wydanej w latach 59 XX wieku, „Hydrodynamika Chemiczna” będącej do tej pory Biblią tego tematu*), które dotyczyły prędkości przepływu dla przepływu opływowego nieściśliwego płynu równoległego do płaskiej powierzchni. Jego wyniki wskazują na istnienie grubszej hydrodynamicznej warstwy granicznej δ_H i cienkiej warstwy dyfuzyjnej δ_D przylegającej

do powierzchni. Ta druga warstwa ma grubość około jednej dziesiątej δ_H . Rysunek 3 przedstawia hydrodynamiczne i dyfuzyjne warstwy graniczne w ustalonym przepływie laminarnym, równoległym do płaskiej płyty, przy czym prędkość głównego strumienia wynosi V_0 .

Badania Petersa układów kropli barwiąca-tekstyli, definiują tę warstwę graniczną jako obszar, w którym stężenie barwnika zmienia swoją wartość na powierzchni o 99% w stosunku do stężenia w kropli. Główną barierą dla transportu substancji rozpuszczonej, na powierzchnię jest właśnie ta dyfuzyjna warstwa graniczna δ_D , która, jak wspomniano wcześniej, jest znacznie cieńsza niż hydrodynamiczna warstwa graniczna δ_H . Jeżeli założymy, że w każdym momencie stężenie substancji rozpuszczonej $C = 0$ (bardzo szybka absorpcja substancji rozpuszczonej przez warstwę) na powierzchni, wówczas rozkład prędkości płynu (**a**) i stężenia substancji rozpuszczonej (**b**) można opisać teoretycznie na rys. 4 gdzie C_0 wynosi jednolite stężenie substancji rozpuszczonej w roztworze przepływającym ze stałą prędkością głównego strumienia V_0 równoległe do powierzchni arkusza folii. Ten bardzo prosty model pokazuje, że $\delta_D \ll \delta_H$, a także ważny fakt, że arkusz filmu nie jest jednorodnie dostępny. Wraz ze wzrostem prędkości przepływu, dyfuzyjna warstwa graniczna maleje, a tym samym wzrasta transfer masy do powierzchni filmu. Stosując ten prosty model do układu wodnego CI Direct Blue 1-celofanu pod kątem 90° , McGregor i Peters wykazali, że $\delta_D \sim 30 \mu m$, co jest w rozsądnej zgodności z wartościami uzyskanymi w praktycznych warunkach barwienia, dla dobrze wymieszanego układu.

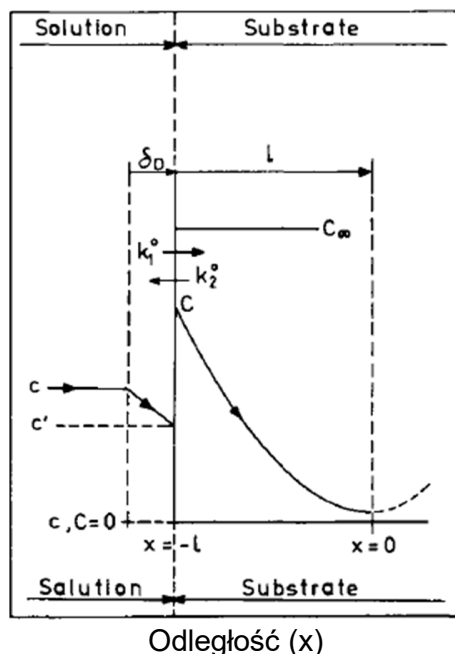


Rys. 3. Hydrodynamiczna i dyfuzyjna warstwa graniczna w ustalonym przepływie laminarnym równoległym do płaskiej płyty. Poziome strzałki przedstawiają prędkość płynu, w wartości i kierunku, w punkcie początkowym strzałek. Dyfuzyjna warstwa graniczna ma grubość (δ_D) około jednej dziesiątej grubości hydrodynamicznej warstwy granicznej (δ_H). Obie warstwy mają kształt paraboliczny; V_0 to prędkość głównego strumienia.



Rys. 4. Teoretyczny rozkład prędkości płynu (a) i stężenia substancji rozpuszczonej (b) na powierzchni płaskiej warstwy zanurzonej w roztworze o jednorodnym stężeniu C_0 , płynącej ze stałą prędkością strumienia głównego V_0 równoległe do powierzchni warstwy. Warstwa adsorbuje substancję rozpuszczoną tak szybko, że przez cały czas $C = 0$ na powierzchni.

Zakładając, jak omówiono wcześniej, że główną barierą dla transportu jest dyfuzyjna warstwa graniczna, McGregor i Peters opracowali model quasi-stacjonarny dla procesu dyfuzji barwnika przez płaską warstwę o grubości $2l$ z roztworu barwnika o stałym stężeniu C . Model ten zilustrowano na rys. 5.



Rys.5. Model dyfuzyjnej warstwy granicznej dla płaskiej warstwy; c to stężenie roztworu; C to stężenie w warstwie; k_1^0 to stała prędkości przejścia barwnika z roztworu do podłoża przez interfejsy przy $x = \pm l$; k_2^0 to stała prędkości przejścia w przeciwnym kierunku przez interfejsy przy $x = \pm l$; l to połowa grubości warstwy.

Nie zagłębiając się w matematyczny opis tych zjawisk stwierdzono, że wpływ natężenia przepływu na szybkość barwienia można teraz wyrazić ilościowo za pomocą parametru

$$L = D_s l / (K D_f \delta_D).$$

Ponieważ natężenie przepływu jest odwrotnie proporcjonalne do δ_D wpływ natężenia przepływu na szybkość barwienia można wyrazić w kategoriach zmiany grubości granicy dyfuzyjnej δ_D . Wraz ze wzrostem natężenia przepływu maleje grubość

dyfuzyjnej warstwy granicznej δ_D , a tym samym rośnie wartość parametru L .

Z prowadzonych badań z drugiej połowy XX wieku nad wpływem przepływu kąpieli barwiącej w aparatach barwarskich na dyfuzję barwnika do powierzchni włókna doprowadziły do następujących stwierdzeń. Przy przepływie laminarnym Liczba Reynoldsa: $Re < \approx 2300$ mamy do czynienia z grubsza warstwą graniczną i większym oporem dyfuzyjnym oraz wolniejszym transportem barwnika do włókna, przy czym istnieje ryzyko nierównomiernych wybarwień.

Przy przepływie turbulentnym mamy do czynienia z wzrostem współczynnika wnikiwania masy, szybszym transportem barwnika, możemy się spodziewać bardziej równomyernih wybarwień.

W niniejszym artykule omówiono wyłącznie pierwszy etap procesu, tj. transport barwnika z kąpieli do powierzchni włókna." Omówienie następnych etapów w kolejnych numerach Informatora.

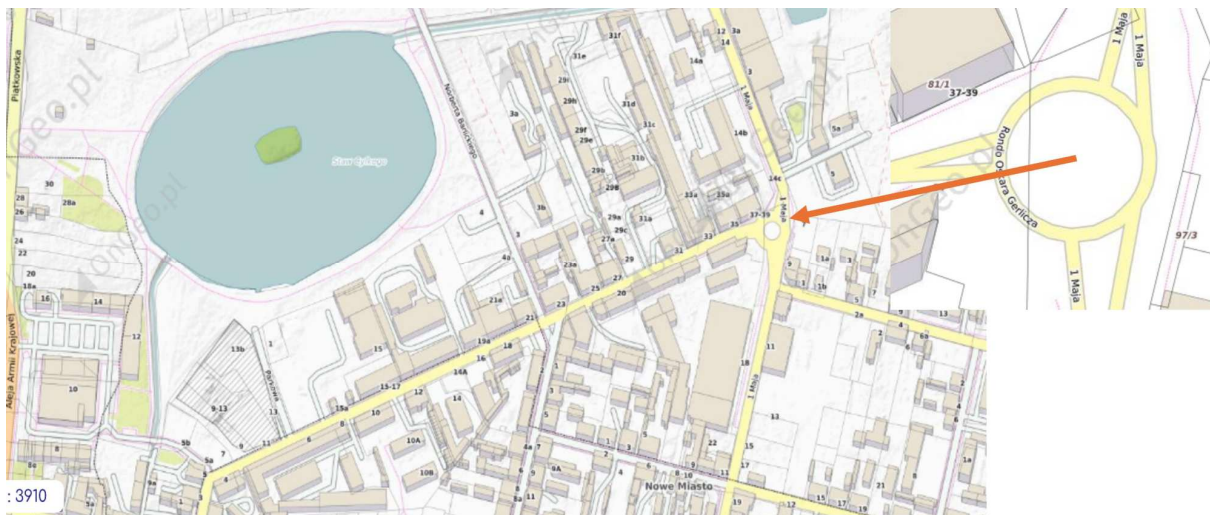
Literatura:

- 1 V. G. Levitch, „Physicochemical Hydrodynamics”. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1962.
- 2 R. H. Peters w „Diffusion in Polymers” (J. Crank i G. S. Park. AP, Nowy Jork, 1968.
- 3 R. McGregor i R. H. Peters, J. Soc. Dyers Colour. 81, 393 (1965).
- 4 J. Crank, „Mathematics of Diffusion”. Oxford Univ. Press (Clarendon), Londyn i NY 1956.
- 5 R. McGregor, J. Soc. Dyers Colour. 81, 429 (1965).
- 6 T. Vickerstaff, „The Physical Chemistry of Dyeing”. Oliver i Boyd, Edynburg, 1954.
- 7 R. H. Peters - Textil Chemistry Vol. III. The Physical Chemistry Of Dyeing. Elsevier, London 1975
- 8 R. McGregor – Diffusion and Sorpcion in Fibres and Film AP. London 1974
9. D. Rattee, M. M. Breuer – The Physical Chemistry of Dye Adsorption AP. London 1974
10. K Venkataraman - The Chemistry of Synthetic Dyes. Vol VII AP New York 1977
11. G. J. Kriczewskij - Dyfuzja i sorpcja w procesach barwienia i drukowania Moskwa 1981

Rondo w Zgierzu im. Oskara Gerlicza - chemika kolorysty i Burmistrza Miasta w 1918 roku

Obchody święta Zgierza odbywające się tradycyjnie w pierwszą sobotę i niedzielę czerwca (6-7 czerwca 2026 r.), spośród wielu

impreszerek towarzyszących były okazją do nadania ronda na Nowym Mieście imienia Oscara Gerlicza.



Odświeżeniu tablicy z nazwą ronda w obecności rodziny Gerliczów i mieszkańców Zgierza dokonali: wnuczka Oskara Gerlicza, Anna Gerlicz, Prezydent Miasta Zgierza Przemysław Stanisławski i Przewodniczący Rady Miasta Zgierza Łukasz Wróblewski (autor zdjęć Krzysztof Głowacki Urząd Miasta Zgierza).

W ten sposób zasłużony dla miasta Oskar Gerlicz dołączył do równie znamienitych jak: Rajmund Rembieliński, Jan Świercz, Jan Śniechowski czy Ignacy Hordliczka, imieniem których nazwane są ulice w tym mieście.

Biogram Oskara Gerlicza (1874–1940)



Zdjęcie Oskara Gerlicza z zachowanych materiałów po ZPB. BORUTA

Oskar Juliusz Teodor Gerlicz jako młody chemik absolwent politechniki w Zurichu przybył do Zgierza z Lubelszczyzny najprawdopodobniej w czasie, kiedy Jan Śniechowski w 1984 roku pod nazwą „Jan Śniechowski” a po zawiązaniu spółki z Ignacym Hordliczką w 1985 roku rozwijali wspólne przedsięwzięcie - fabrykę barwników w Zgierzu zlokalizowaną przy ul. Zegrzańskiej 6 (obecnie Henryka Dąbrowskiego 27). Zamieszkał na tej samej, posesji gdzie mieszkał do śmierci w 1940 r.

Informacje genealogiczne wskazują datę ślubu z Heleną Jędrzejewską na rok 1902 w Zgierzu, a urodziny pierwszego ich dziecka syna Kacpra na 1903 r. W fabryce pełnił funkcję głównego inżyniera chemika i kierownika technicznego. Gdy zakład stał się ekologicznie zbyt uciążliwy dla okolicznych mieszkańców i miasta odegrał istotną rolę w jego relokacji.

W 1905 roku w porozumieniu z bratem Arturem, potajemnie wykupił pod własnym nazwiskiem (co zapobiegło spekulacji cenowej) działki rolnicze przy ulicach Leśnej i Polnej.

Wtedy też prawdopodobnie stał się właścicielem zlokalizowanego w sąsiedztwie posiadłości „Okręglik”, która do dziś jest w posiadaniu rodziny.

Nowe tereny o powierzchni ok. 40 hektarów nad Bzurą, umożliwiły budowę nowoczesnego kompleksu fabrycznego przy ul. Leśnej 7, do którego przeniesiono produkcję z centrum miasta.

W 1909 r. firma została przekształcona w spółkę akcyjną pod nazwą "Towarzystwo Akcyjne Fabryki Barwników Anilinowych i Produktów Chemicznych w Zgierzu", a Oskar Gerlicz został dołączony do akcjonariuszy Spółki pełniąc w niej obowiązki dyrektora technicznego w latach 1910-1914.

Równie istotny był jego wkład w administrację miasta podczas I wojny światowej i u progu niepodległości. W sierpniu 1914 roku stanął na czele zgierskiej Milicji Obywatelskiej jako jej naczelnik. W okresie okupacji niemieckiej był dwukrotnie mianowany wiceburmistrzem Zgierza. Pod koniec 1917 roku uzyskał mandat radnego Rady Miejskiej m. Zgierza z Kurii I. Jako radny pracował w Sekcji Finansowo-Budżetowej oraz Sekcji Budowy Miasta i Dróg, pełniąc też funkcję ławnika Magistratu. Kulminacją jego działalności było wybranie go 11 lipca 1918 roku na burmistrza Zgierza; urząd ten sprawował od sierpnia do grudnia 1918 roku.

* * *

Przy opracowywaniu powyższej Informacji wykorzystano zdjęcia z uroczystości nadania imienia ronda i biogram Oskara Gerlicza dostarczone przez Muzeum Historii Miasta Zgierza. Pozostałe uzyskano z zasobów internetowych i wydawnictw książkowych: *Sto lat koloru* T. Przygucki, *Barwnikarstwo w Polsce* T. Budzisz, *Historia Kolorystyki* E. Trepka.

Zebrane materiały opracował z inicjatywą tej publikacji, mieszkanką Zgierza, kolorystką, wieloletnią pracownicą ZPB BORUTA zaangażowaną w odbudowę samorządu terytorialnego w Polsce od 1990 roku Miasta Zgierza Marianną Romanowicz, też chemik kolorysta i wieloletni pracownik ZPB BORUTA Stanisław Pruś, aktualnie oboje reprezentujący Stowarzyszenie Polskich Chemików Kolorystów.

Bal Karnawałowy 2026

Jerzy Piestrzeniewicz,

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Łódzki Instytut Technologiczny

Po raz kolejny, w sobotni wieczór, w dniu 24 stycznia 2026 r. w restauracji „Satyna” w Łodzi, odbył się tradycyjny Bal Karnawałowy. Po raz drugi bal zorganizowano w nowej formule, bo uczestniczyli w nim obok grona specjalistów kolorystów ze Stowarzyszenia Polskich Chemików Kolorystów wraz z sympatykami, przedstawiciele Stowarzyszenia Włókienników Polskich. Łącznie w tej wyjątkowo udanej imprezie towarzyskiej i rozrywkowej uczestniczyło 90 osób. Liczba ta świadczy o rosnącym z każdym rokiem zainteresowaniu taką formą integracji, połączoną z rozrywką na wysokim poziomie.

Coroczne bale, organizowane od kilkadziesiąt lat, służą integrowaniu się specjalistów chemików kolorystów a ostatnio również włókienników. W spotkaniach uczestniczą reprezentanci różnych zakładów przemysłowych, firm zagranicznych działających na rzecz przemysłu, organizacji oraz stowarzyszeń związanych głównie z polskim przemysłem tekstylnym. Takie imprezy, dają oprócz dobrej zabawy, możliwość wymiany doświadczeń zawodowych, nawiązywania kontaktów towarzyskich oraz specjalistycznych i branżowych. Tegoroczny Bal otworzył główny organizator -Wiceprezes SPChK kol. Stanisław Prus, oraz m.in. Prezesi SPChK kol. Anetta Walawska i SWP kol. Ireneusz Chabrowski.

Po słowach zachęcających do wspólnej zabawy impreza nabrała tempa. Na uznanie zasługuje dobór menu w postaci rozmaitych przystawek, dań zimnych i gorących, ciast, owoców, napoi a także bardzo sprawna obsługa ze strony lokalu. Podkreślić należy doskonałą oprawę muzyczną balu, przygotowaną i prowadzoną perfekcyjnie przez DJ oraz towarzyszące efekty w postaci iluminacji świetlnych. W prezentowanym repertuarze znalazły się głównie utwory bardzo rytmiczne i pobudzające oraz zachęcające do pływów na parkiecie. Dzięki doskonale dobranemu repertuariowi dostępny parkiet był oblegany

praktycznie przez cały czas trwania utworów muzycznych. Prezentowany repertuar dostosowany był do tancerzy w różnym wieku, a więc były piosenki w wykonaniu m.in. Piotra Szczepanika, Krzysztofa Krawczyka, Budki Suflera, Macieja Maleńczuka, zespołów: Smokie, Boney M i ABBA oraz głośny hiszpańskojęzyczny przebój „Despacito” aż po współczesne piosenki w wykonaniu np. Darii Zawiałow, Vito Bambino, Dawida Podsiadło czy Blanki.

Tak gorące rytmy pobudzały zmysły tancerzy i dlatego szaleństwo na parkiecie, łącznie z głośnym śpiewaniem refrenów, nie było końca. Tegoroczny Bal Karnawałowy spełnił swoją funkcję, zakładaną przez organizatorów, integracji oraz świetnej zabawy i poznawania coraz to nowych członków i sympatyków obydwu Stowarzyszeń: SPChK i SWP.

Organizatorzy zachęcają i liczą na dalsze rozpropagowanie tej formy spotkań towarzyskich, które sprawdzają się od wielu lat. Dla większości uczestników jest to świetna forma zabawy, możliwość zawierania nowych kontaktów oraz okazja do szampańskiej zabawy do rana. Uczestnicy Balu wyrażają duże uznanie dla organizatorów za perfekcyjne przygotowanie tego niełatwego logistycznie przedsięwzięcia, wiążącego się z ogromnym wysiłkiem i nakładem pracy, ale dającym niezapomniane doznania towarzyskie i rozrywkowe.





Do zobaczenia za rok

