

BIOTRIBOLOGY OF BIOREACTORS IN ELECTORRHEOLOGY ASPECTS

Krzysztof Wierzcholski

Gdansk University of Technology

80-952 Gdańsk, Narutowicza 11/12

tel.: +48 58 6901348, +48 058 3476126

fax: +48 058 6901399

e-mail: wierzch@pg.gda.pl, wierzch@am.gdynia.pl

Abstract

The electromagnetic fields have a great influence on the behaviour of all the nutrient liquids occurring in bioreactors and on the living tissue. Some benefits can be taken from the effects of the electromagnetic fields on the cultivating tissue in bioreactor: viscosity changes of nutrient liquids, hyperthermal conditions, friction force changes.

BIOTRIBOLOGIA BIOREAKTORÓW W ASPEKCIE ELEKTROREOLOGII

Streszczenie

Pole elektromagnetyczne ma istotny wpływ na własności elektroteologiczne cieczy odżywczych a także na żyjącą i wzrastającą warstwę wierzchnią hodowanej tkanki w bioreaktorach. Korzyści jakie na skutek działania pola elektromagnetycznego uzyskuje hodowana tkanka w bioreaktorze są następujące: możliwość kontrolowania zmian lepkości biologicznej cieczy odżywczej w bioreaktorze, kontrola warunków hypertermalnych podczas hodowli, kontrolowane zmiany wartości sił tarcia.

1. Biologiczne ciecze elektroteologiczne

Płyn elektroteologiczny jest substancją zmieniającą postać oraz lepkość pod wpływem pola magnetycznego. W zależności od natężenia pola magnetycznego, ciecz reologiczna może płynąć swobodnie jak woda, cieknąć jak olej lub tężeć jak żelatyna. Płyny te potrafią zmieniać stan skupienia oraz swoją lepkość dynamiczną w ciągu mikrosekund.

Płyn reologiczny składa się z mikroskopijnych cząstek (drobin) zawieszonych w izolacyjnej cieczy i jest stosunkowo łatwy do wykonania. Zawieszone drobinę tworzą rozmaite struktury. Gdy drobinę przemieszczają się swobodnie, to ruch poszczególnych cząstek pozostaje wzajemnie niezależny. Gdy płyn ulega stężeniu, wtedy drobinę łączą się ze sobą tworząc łańcuchy i kolumny. W przypadku działania pola magnetycznego, drobinę ustawiają się w taki sposób, że płyn ulegnie zestaleniu. Gdy usuniemy pole, drobinę powrócą do losowych położenia i substancja stanie się znowu ciekle.

W roku 1947 Willis M. Wislow [4] jako pierwszy wynalazł płyn elektroteologiczny. Szybko też zauważono, że skrobia kukurydziana zawieszona w kukurydzianym oleju tworzy płyn elektroteologiczny. Ta odżywcza mieszanka przejawia interesujące właściwości w silnym polu elektromagnetycznym rzędu 1000V/mm. Tak więc efekt ten można uzyskać na przykład w płynie umieszczonym pomiędzy dwoma metalowymi elektrodami oddalonymi od siebie o 1mm po przyłożeniu do nich napięcia 1000V. Do tej pory płyny elektroteologiczne miały zastosowanie w prototypowych układach hamulcowych, sprzęgłach, amortyzatorach, urządzeniach rozruchowych, zaworach regulacyjnych, w łożyskach ślizgowych [3] ponadto w

stawach człowieka przy długotrwałej magnetoterapii stosowanej w sposób ciągły. W ostatnim czasie odżywcze płyny elektoreologiczne okazały się przydatne jako płyny odżywcze w bioreaktorach między innymi podczas hodowli chrząstek stawowych.

2. Dlaczego stosujemy ciecze elektoreologiczne w bioreaktorach

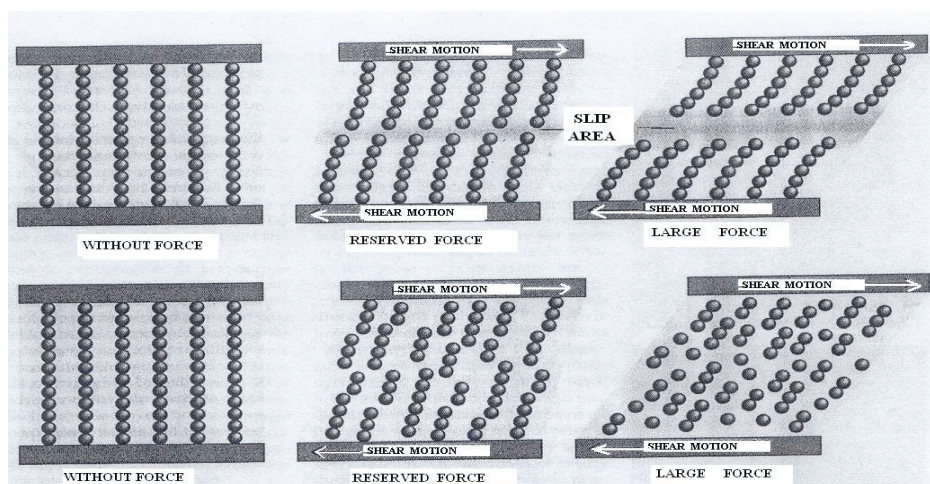
Hodowla chrząstki stawowej wymaga ciągłego sterowania wartościami sił tarcia, które powstają w trakcie opływania warstwy wierzchniej próbki chrząstki cienką lepłą warstwą odżywczej cieczy biologicznej w bioreaktorze. Warstewka ta ma grubość zaledwie od kilkunastu do kilkudziesięciu mikrometrów. Sterowanie wartościami sił tarcia dokonuje się poprzez wywoływanie zmian wartości lepkości w odżywczej cieczy biologicznej o własnościach elektoreologicznych. Optymalna wartość siły tarcia ma wpływ na czas trwania hodowli oraz na jakość i właściwości hodowanych tkanek.

Wzrost lepkości i zestalanie się płynu elektoreologicznego pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego i magnetycznego to proces etapowy. Liczne badania doświadczalne wykazały, że tysięczne części sekundy wystarczają drobinom na uformowanie długich łańcuchów, podobnych do sznurów pereł. Im dłuższe i grubsze są te łańcuchy, tym lepkość cieczy bardziej wzrasta. Kilka sekund później można dostrzec agregację łańcuchów w kolumny. Kolumny te mają na ogół średnicę około jednego mikrometra.

Łańcuchy drobin blokują ruch odżywczego płynu elektoreologicznego co umożliwia również sterowanie prędkością przepływu.

Według teorii Klingenberga (górne ilustracje na rys.1) łańcuchy ulegają nachyleniu i wyciągnięciu przy czym ich końcówki przylegają do elektrod przesuwanych ruchem ścinającym. Ostatecznym rezultatem jest zrywanie łańcuchów w części środkowej. Wytworzona tak zwana strefa poślizgu rozszerza się wraz ze wzrostem siły ścinającej.

Według teorii Halseya, Martina (dolne ilustracje na rys.1) łańcuchy drobin płyną wraz z przepływem płynu a w miarę wzrostu siły ścinającej ulegają pochyleniu i fragmentacji [3].



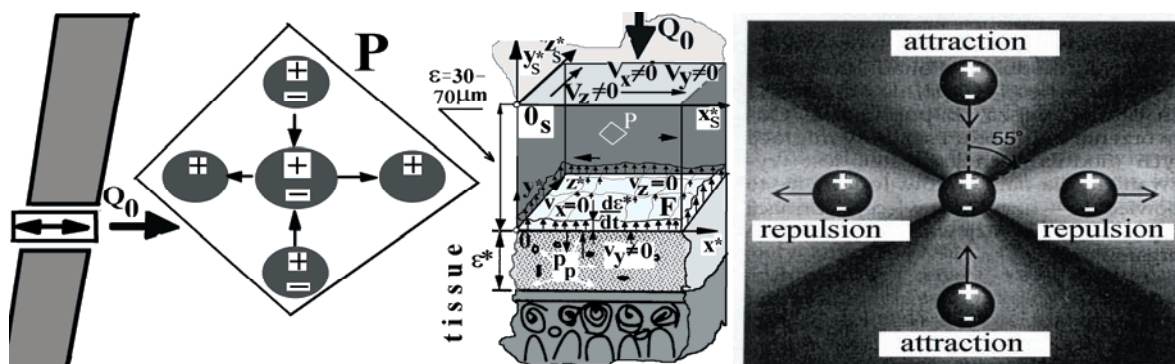
Rys. 1. Przeszczanie się łańcuchów drobin (cząstek) zawieszonych w elektoreologicznej cieczy pod wpływem pola elektromagnetycznego według Klingenberga (górne ilustracje) i według Halseya a (dolne ilustracje)

Fig. 1. Displacements of molecule chains suspended in electrorheological liquids due to electromagnetic field after Klingenberg (upper illustrations) and after Halseya (lower illustrations)

Odżywcza ciecz reologiczna występująca podczas hodowli chrząstki stawowej w bioreaktorze powinna odznaczać się zdolnością zmiany wartości lepkości przy stosunkowo małych naprężeniach występujących w cienkiej warstwie cieczy oraz w warstewce

wierzchniej hodowanej tkanki. Kontrola lepkości pozornej w nienewtonowskiej, reologicznej cieczy odżywczej w bioreaktorze stała się możliwa ponieważ zbadane zostały jej właściwości reologiczne w skali nanometra. Oddziaływanie dwóch naładowanych drobin jest kluczem do zrozumienia efektu elektoreologicznego. Drobina, w której można wyróżnić dwa różnoimiennie naładowane bieguny, będzie przyciągać lub odpychać drugą, podobną sobie.

Ciecze elektoreologiczne stosowane podczas hodowli tkanki w bioreaktorze, działają na zasadzie ciągłej zmiany lepkości pozornej roboczej cieczy odżywczej a w ślad za tym dokonywać można zmian wartości sił tarcia i wartości makronaprzeżeń występujących w cienkiej warstwie wierzchniej wzrastającej tkanki w bioreaktorze. Możliwość kontrolowania szybkości przepływu płynu elektoreologicznego dzięki regulacji przyłożonego pola elektrycznego i magnetycznego umożliwia skonstruowanie inteligentnego bioreaktora. Mechanizm odpychania i przyciągania cząsteczek w płynie odżywczym bioreaktora przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Powiększona cząsteczka P składająca się z czterech wzajemnie przyciągających się i odpychających się drobin zawieszonych w izolacyjnej cieczy odżywczej formującej cienki film cieczowy na warstwie wierzchniej hodowanej tkanki w bioreaktorze, Q_0 -wydatek objętościowy cieczy

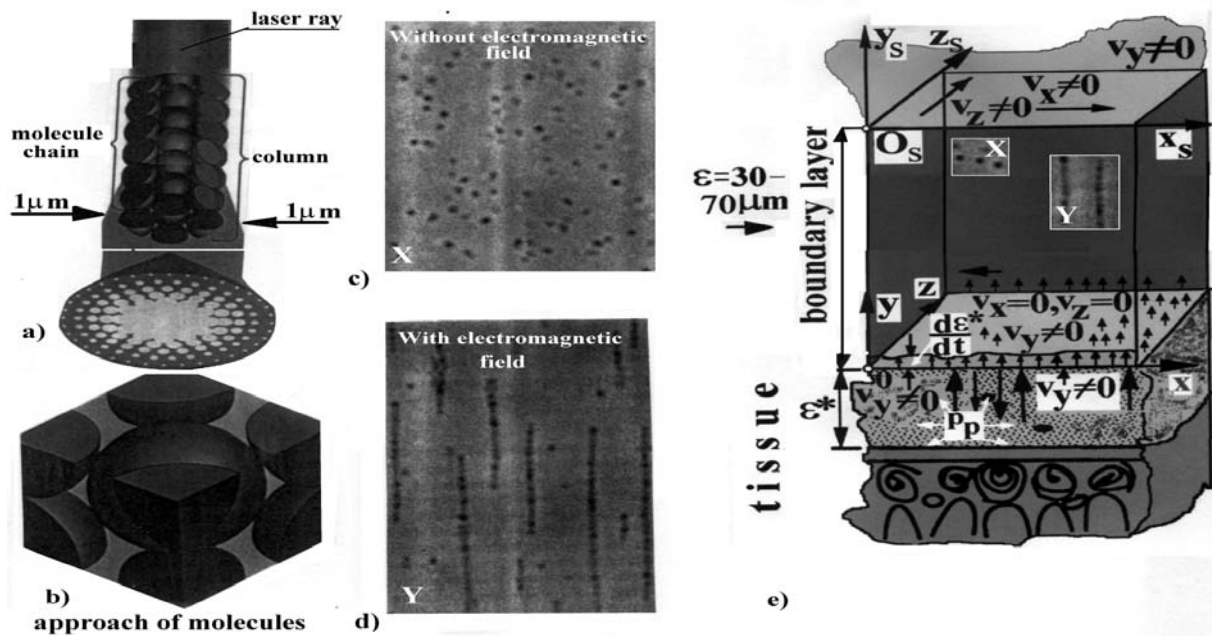
Fig. 2. Surface of particle P containing four mutually repulsing and attracting molecules suspended in insulation nutrient liquid creating thin fluid film on the superficial layer of cultivated tissue in bioreactor, Q_0 -volume flow rate

W konsekwencji przyciągania się drobin zostają uformowane łańcuchy stanowiące o wartości lepkości cieczy odżywczej w bioreaktorze.

3. Polaryzowalność elektryczna podstawą efektu elektoreologicznego

Fizyczną podstawą efektu elektoreologicznego jest znane zjawisko efektu polaryzowalności elektrycznej. W polu elektrycznym dodatnio naładowane protony w danej drobinie będą przyciągane przez elektrodę, natomiast elektroda przeciwna przyciągać będzie ujemnie naładowane elektrony[4]. W danej drobinie ładunki ujemne i dodatnie ulegną pewnemu przesunięciu w przeciwną stronę. W ten sposób pole elektryczne doprowadzi do powstania elektrycznego dipolu a ładunki dodatnie i ujemne można wtedy porównać do biegunów magnesu. Natężenie opisanego efektu zależy od własności polaryzowalności konkretnego płynu odżywczego stosowanego w bioreaktorze. Siły przyciągające powodują sklejanie się dipoli a następnie formowanie się znacznie grubszych kolumn Rys. 3 a i b. Płyn odżywczy o własnościach elektoreologicznych bez działania pola elektromagnetycznego przedstawiono na Rys. 3c. Formowanie się drobin w łańcuchy na skutek działania pola elektromagnetycznego przedstawiono na Rys. 3d. Kilka mikrosekund później można dostrzec agregację łańcuchów w kolumny. Drobiny przedstawione na Rys. 3c,d mają średnicę około jednego mikrometra.

Na Rys.3e przedstawiono zastosowanie odżywczego płynu elektoreologicznego w trakcie polewania hodowanego preparatu chrząstki stawowej w bioreaktorze. Cienka warstwa graniczna płynu odżywczego ma grubość sięgającą do 70 mikronów. Sterowanie lepkością cieczy odżywczej jest możliwe dzięki własnościom elektoreologicznym cieczy.



Rys. 3. a) Łańcuchy drobin łączone w kolumnę [3], b) Efekt zbliżenia cząsteczek w kolumnie w powiększeniu, c) Płyn elektoreologiczny bez działania pola elektromagnetycznego, d) Płyn elektoreologiczny po działaniu pola elektromagnetycznego z uformowanymi łańcuchami cząsteczek łączącymi się w kolumny, e) Warstwa cieczy elektoreologicznej na powierzchni wzrastającej tkanki w bioreaktorze

Fig. 3. a) The chains of molecules connected in column [3], b) Enlargement effect of molecules approach, c) Electrorheological liquid without electromagnetic field d) Electrorheological liquid with electromagnetic field to take shape chains of molecules creating column e) Thin layer of electrorheological liquid on the growing tissue surface in bioreactor

4. Pola elektromagnetyczne w bioreaktorach

W bioreaktorach do hodowli chrząstek stawowych mogą być stosowane pola elektromagnetyczne z uwzględnieniem problemu niskiej i wysokiej częstotliwości.

Problemy o niskiej częstotliwości są brane pod uwagę w zastosowaniach biologicznych bioreaktorów w przypadku gdy pole elektryczne i magnetyczne nie jest wzajemnie sprzężone. Nie występują wtedy prądy przesunięcia. Natężenie pola elektrycznego E i natężenie pola magnetycznego H nie są sprzężone. Efekty oddziaływania pola elektrycznego i magnetycznego na wzrastającą chrząstkę stawową w bioreaktorze oraz na płyn odżywczy dostarczany do bioreaktora mogą być rozpatrywane oddzielnie bez sprzężonych efektów. Możemy wtedy mieć do czynienia z wysokimi napięciami i niskimi natężeniami oraz z niskimi napięciami i wysokimi natężeniami [1,2].

Problemy o wysokiej częstotliwości są brane pod uwagę w zastosowaniach biologicznych bioreaktorów w przypadku gdy pole elektryczne i magnetyczne jest wzajemnie sprzężone a częstotliwość osiąga wartość 10 kHz.

5. Nowe kierunki badawcze z zakresu biotribologii bioreaktorów

- Analizy współczynników materiałowych znajdujących zastosowanie w przeszczepach stawów naturalnych i w endoprotezach stawów biodrowych pod kątem optymalizacji na

zużycie jak również regulacji wysokości szczeliny pomiędzy współpracującymi powierzchniami z uwzględnieniem rzędu wielkości w nanoskali.

- Związki konstytutywne pomiędzy naprężeniami a odkształceniami a także analiza współczynników materiałowych w tym modułów sprężystości, współczynników.

Poissona przewodności cieplnej, lepkości pozornych dla miękkich, hiperelastycznych, anizotropowych, lepkosprężystych, inteligentnych bioaktywnych tkanek chrząstki stawowej, podchrzęstnej, tkanki kostnej o dużych deformacjach oraz dla biologicznych nienewtonowskich, pseudoplastycznych cieczy odżywczych stosowanych w bioreaktorach.

- Pierwszy i drugi tensor naprężeń Piola-Kirchoffa oraz tensor odkształceń Lagrange'a w biomateriałach dla związków geometrycznych pomiędzy odkształceniami a przemieszczeniami.

- Pomiary struktury geometrycznej powierzchni zdrowej i chorej a także zużytej chrząstki stawowej głów kostnych naturalnego stawu biodrowego człowieka a także endoprotez stawu biodrowego człowieka przy wykorzystaniu czujników laserowych i mechanicznych oraz przy uwzględnieniu opisu probabilistycznego z uwzględnieniem odchyłeń standartowych mierzonych wartości.

- Przygotowanie nowych biologicznych odżywczych czynników smarujących oraz opracowanie ich biofizycznych właściwości z uwzględnieniem lepkości, konsystencji stabilności w czasie oraz odporności na degradację.

- Eksperymentalne pomiary prędkości przepływu smarującego cienkich filmach cieczo- wych na powierzchniach hodowanych tkanek w bioreaktorach a także pomiary wartości naprężeń temperatury w warstwie wierzchniej tkanki a następnie sił tarcia i współczynników tarcia towarzyszących procesom hodowli łatwo deformujących się chrząstek.

- Eksperymentalne pomiary sił tarcia i współczynników tarcia a także zużycia w przypadku laminarnego stacjonarnego smarowania preparatów tkankowych o deformowanych powierzchniach chrząstki.

- Eksperymentalne pomiary biokompatybilności nowych materiałów sposobem in vivo oraz in vitro przy uwzględnieniu właściwości warstwy wierzchniej tkanek a w szczególności chrząstek stawowych.

Literatura

- [1] Burais N., Baraton P., Gaspard J. Y., Numerical modelisation of induce currents in human body by electromagnetic apparatus in medium frequency range CEM,98, 8-11 June 1998, Brest, France, 1998.
- [2] Gabriel S., Lau R. W., Gabriel C., The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues, Phys,Med.Biol.,Vol.41, 1996, pp.2271-93, 1996.
- [3] Mischczak A., Kostencki P., Wierzcholski K., Electrorheological and magnetorheological fluids for tribology.(in Polish).Plyny elektroeologiczne i magnetoreologiczne na uslugach tribologii.Participation of the Author* is 33%.Communication.VI Scientific Conference of Mechanization Proceedings, Agri.Univ.Szczecin, Institute of Mech. Proc., pp. 77, 1994.
- [4] Winslow W. M., Induced Vibration of Suspensions. Journal of Applied Physics,XII, 1949, vol. 20, nr. 12, pp.1137-1140, 1949.

