

# WPLYW PRZEPUSZCZALNOŚCI POWIETRZA TKANINY POKRYCIA NA ROZKŁAD CIŚNIENIA W SKRZYDLE PARALOTNI

*Paulina Maślanka*

*Katedra Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej i Chemii  
Materiałów Polimerowych; Interdyscyplinarna Szkoła Doktorska,  
Politechnika Łódzka*

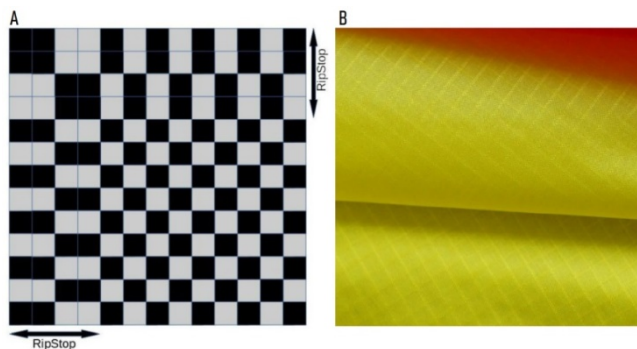
DOI 10.34658/9788366741805.15

## **1. Wstęp**

Płat nośny paralotni w całości pokryty jest tkaniną, bez usztywnień konstrukcji. Lot następuje dzięki nadciśnieniu w profilu skrzydła o kształcie aerodynamicznym i powietrzu dostającemu się przez wloty na krawędzi natarcia. Stabilność i bezpieczeństwo lotu zapewniają określone własności materiałów pokrycia: niska masa powierzchniowa, duża wytrzymałość, odporność na odkształcenia, minimalna przepuszczalność powietrza. Podstawowy parametr materiałowy to przepuszczalność powietrza, co zapewnia zadowalające charakterystyki podczas lotu. Obliczenia numeryczne zostały wykonane metodą objętości skończonych. Analiza zagadnienia wymagała skorelowania problematyki włókienniczej z aerodynamiczną.

## **2. Właściwości materiałów oraz ich dobór do dalszej analizy**

Materiały pokrycia skrzydła paralotni muszą spełniać pewne wymagania. Podstawowe to minimalna przepuszczalność powietrza, duża wytrzymałość, lekkość, odporność na promieniowanie UV i znaczna sztywność. Tkaniny wykonane są z Nylonu (PA 6.6). Dziesięciofilamentowe nitki o masie 3.3 *dtex* przeplatane są według schematu płóciennego, wykorzystując technikę wzmocnienia *Rip-Stop* (rys. 1a); na 1 m szerokości tkaniny przypada 6500-7000 nitek osnowy [6], co zapewnia dużą wytrzymałość przy zachowaniu małej masy powierzchniowej.



Rys. 1. Uproszczonego schemat splotu tkaniny stosowanej do produkcji skrzydła paralotni – A, przykład tkaniny stosowanej do produkcji skrzydła paralotni – B.

*Źródło: opracowanie własne.*

Stosowane jest również pokrycie materiału impregnatem, który zmniejsza przepuszczalność powietrza. Warstwa apretury jest równomierna a jej masa powierzchniowa nie przekracza  $10\text{g/m}^2$  (w zależności od modelu tkaniny grubość może być niższa) [6]. Główny składnik mieszanek impregnatów to żywice poliuretanowe. Możliwe jest stosowanie różnych proporcji izocyjanów z poliolami oraz innych, dodatkowych składników, w zależności od wymagań stawianych gotowemu produktowi (np. różna sztywność) [5]. Dokładne składy i proporcje mieszanek w apreturze nie są podawane przez producentów.

Przeanalizowano trzy tkaniny o różnych wartościach przepuszczalności powietrza (tab. 1). Materiał o minimalnej przepuszczalności powietrza jest stosowany obecnie, dwa kolejne to materiał używany ponad 20 lat temu i poddany degradacji hydrolityczno-mechanicznej.

**Tabela 1.** Wybrane parametry tkanin wyselekcjonowanych do dalszej analizy

Tkanina	Przepuszczalność powietrza $\left[\frac{1}{\text{m}^2 \cdot \text{min}}\right]$ pod ciśnieniem 2000 Pa	Masa powierzchniowa [g/m <sup>2</sup> ]	Zapełnienie nitkami (w obu kierunkach) [l. nitek/cm]
SKYTEX 27 CLASSIC 2	3	29	70
PORCHER MARINE 9017 PU E38A	40	40	60
SKYTEX 36 po degradacji hydrolityczno-mechanicznej	200	34	65

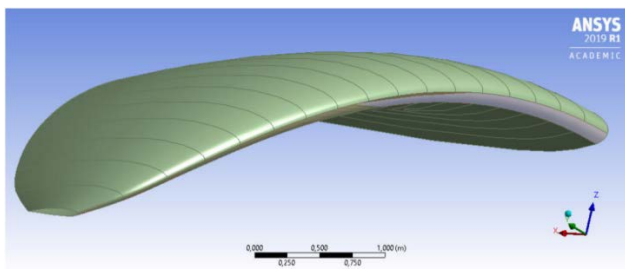
*Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z porcher.eu*

Przedstawiono także model opływu paralotni pokrytej materiałem teoretycznym, o zerowej przepuszczalności powietrza. Wyniki tego przypadku mogą być

referencyjne i ułatwić ocenę charakterystyk aerodynamicznych pozostałych przypadków [4].

## 5. Przygotowanie geometrii oraz siatki obliczeniowej

Producenci nie podają pełnych danych obecnie produkowanych skrzydeł. Użytkownik może znaleźć informacje dotyczące jedynie powierzchni skrzydła, jego rozpiętości, czy promienia ugięcia parolotni napełnionej powietrzem. Stąd samodzielnie zwymiarowano profil lotniczy i dodatkowe parametry obrysu. Na podstawie zebranych wymiarów napisano prosty program w środowisku *Matlab*, który generuje współrzędne punktów bazowych geometrii skrzydła (modelowano jedynie połowę skrzydła). Wprowadzenie współrzędnych do programu *ANSYS Design Modeler* i przeprowadzenie przez nie powierzchni za pomocą narzędzia *skin/loft*, pozwoliło na odtworzenie przestrzennej geometrii skrzydła (rys. 2). Dla umożliwienia zastosowania narzędzia *Porous Media* (używanego dla obiektów o zadanej przepuszczalności powietrza [1]), przyjęto grubość ścianek większą od faktycznej ( $g=2\text{ mm}$ ).



Rys. 2. Geometria połowy parolotni, bazująca na wymiarach rzeczywistego modelu.

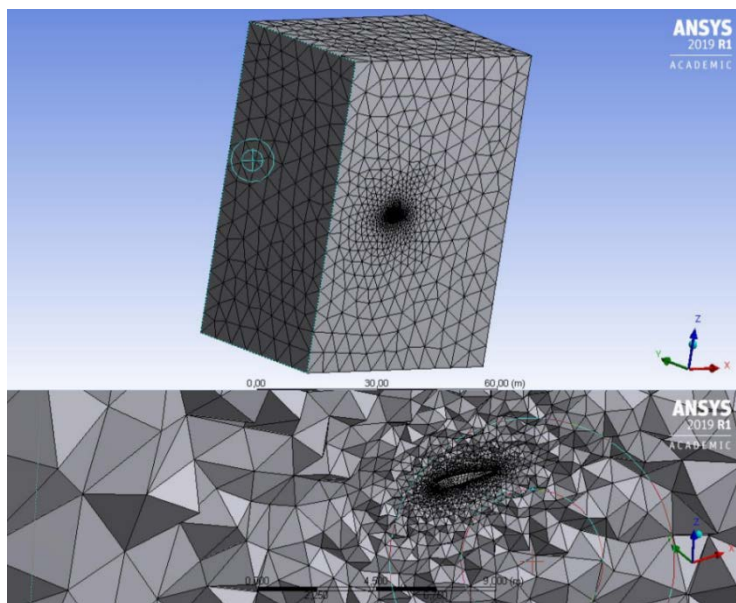
*Źródło: opracowanie własne.*

Wokół skrzydła utworzono obszar obliczeniowy w kształcie prostopadłościanu, o wymiarach znacznie większych niż wymiary parolotni. Jedną z powierzchni tworzących prostopadłościan przechodziła przez największy profil lotniczy (płaszczyznę symetrii), gdzie przyjęto warunek brzegowy *Symmetry*. Pozostałym ściankom prostopadłościanu, położonym w dużej odległości od obiektu i stanowiącym granice obszaru obliczeniowego, nadano warunek *Pressure-far-field*, określający przepływ niezaburzony, tj. prędkość powietrza, temperaturę, ciśnienie etc.

Ściankom tworzącym powierzchnie skrzydła parolotni nadano warunek brzegowy *Interior*, co umożliwiło zastosowanie narzędzia *Porous Media*. Przypadek parolotni pokrytej materiałem nieprzepuszczającym powietrza został rozwiązany z warunkiem brzegowym *wall*; wiązało się to również z implementacją mniej skomplikowanej geometrii (ścianki parolotni o pomijalnie małej grubości, dążącej do zera).

Po określeniu warunków brzegowych rozpoczęto tworzenie siatki obliczeniowej objętości skończonych. Zastosowano następujące narzędzia programu ANSYS Meshing [2]:

- *Sweep Method* – tworzenie siatek strukturalnych (komórki sześciennie/pryzmatyczne); zastosowanie dla obiektów ekstrudowanych, w tym przypadku paralotnia i jej wnętrze.
- *Edge Sizing* – określanie ilości węzłów na krawędziach (stosując tę metodę podzielone zostały: krawędzie tworzące górny i dolny obrys profilu lotniczego oraz nadające grubości ścianek paralotni).
- *Face Sizing* – określenie wymiarów elementów na wskazanych powierzchniach (w tym wypadku komórki wewnątrz skrzydła, w jego płaszczyźnie symetrii).
- *Tetrahedrons Patch Conforming Method* – tworzenie siatki niestructuralnej (zbudowanej z elementów czworościennych), co zastosowano dla otoczenia skrzydła.



Rys. 3. Siatka obliczeniowa objętości skończonych, wygenerowana w programie ANSYS Meshing.

Źródło: opracowanie własne.

Następnie wygenerowano siatkę charakteryzującą się bardzo małymi elementami wewnątrz i w pobliżu badanego obiektu. Udało się wykorzystać elementy strukturalne (sześciennie i pryzmatyczne) do dyskretyzacji ścianek i wnętrza paralotni. Komórki takie zapewniają lepszą stabilność i dokładność obliczeń numerycznych. Budowa w pełni strukturalnej siatki obliczeniowej jest nieefektywna, stąd obszar wokół

paralotni dyskretyzowano elementami czworobocianowymi. Siatka (rys. 3) zbudowana była z 474 264 komórek oraz charakteryzowała się dobrą jakością (bazując na parametrach Orthogonal Quality = 0.76 oraz Skewness = 0.25).

### Rozwiązanie problemu

Po wygenerowaniu siatki obliczeniowej możliwy był jej eksport do programu ANSYS Fluent i obliczenia numeryczne. Dla ich przeprowadzenia należy określić modele fizyczne i warunki opływu skrzydła. Przyjęto przepływ jako turbulentny i został dla niego wybrany model turbulencji Spalart-Allmaras, dający spodziewane pole parametrów powietrza. Obszarowi otaczającemu obiekt został nadany model powietrze → gaz idealny.

Dla przyjętego warunku brzegowego Pressure-far-field, na wskazanych powierzchniach ograniczających obszar obliczeniowy, wprowadzono następujące parametry przepływu niezaburzonego: prędkość 45 km/h; kąt natarcia 60; ciśnienie 101325 Pa; temperatura 27°C.

Dla elementów ścianki paralotni zastosowano model Porous Media, czyli modelowanie przepływu przez obiekty przepuszczające powietrze. Pozwala to określić parametry związane z przepuszczalnością powietrza (tab. 2).

**Tabela 2.** Wartości parametru *Porous Resistance* ( $1/\alpha$ ) dla odpowiadających mu materiałów

Tkanina	Przepuszczalność powietrza $\left[\frac{1}{\text{m}^2 \cdot \text{min}}\right]$	v [m/s]	$1/\alpha$ [ $1/\text{m}^2$ ]
SKYTEX 27 CLASSIC 2 [X]	3	0,00005	$1.118 \cdot 10^{15}$
PORCHER MARINE 9017 PU E38A [X]	40	0,00067	$8.385 \cdot 10^{13}$
SKYTEX 36 [X] po degradacji hydrolityczno-mechanicznej	200	0,00333	$1.677 \cdot 10^{13}$

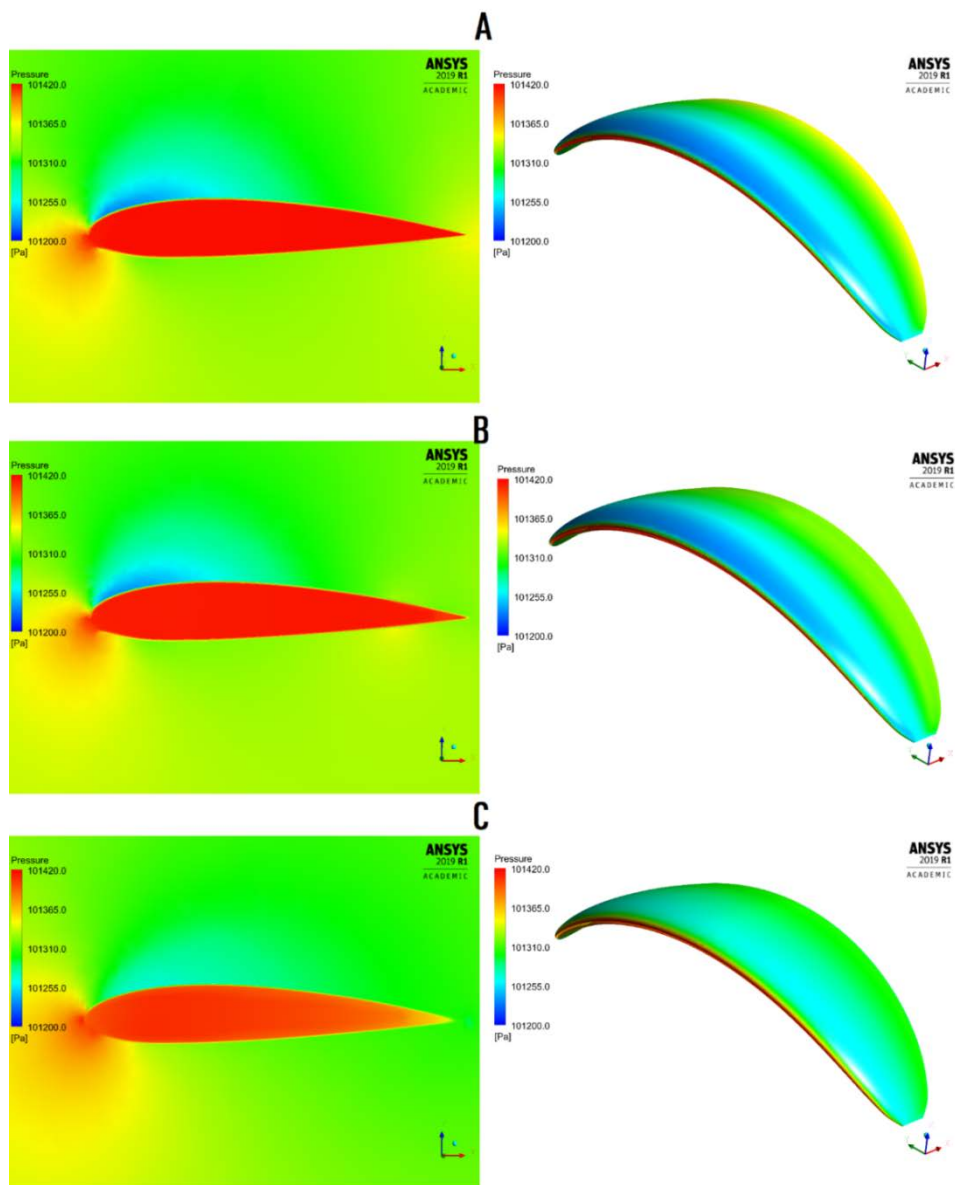
Źródło: opracowanie własne.

Po zdefiniowaniu modeli fizycznych rozpoczęto obliczenia. Dla stabilizacji analizy zaczęto od zadania małej wartości liczby Couranta (równiej 2). Gdy zauważono tendencję do stabilizacji, liczbę Couranta można było stopniowo zwiększać (na końcu była równa 10).

Obliczenia opływu skrzydła wykonanego z materiałów przepuszczalnych wymagały około 1000-1500 iteracji. Dla przypadku referencyjnego (pokrycie materiałem nieprzepuszczającym powietrza), było to 800 iteracji. Różnica wynikała z różnych warunków brzegowych i użycia bardziej skomplikowanej siatki dla przypadków, gdzie zastosowano model *Porous Media*.

## **6. Omówienie wyników**

Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 4, 5 oraz w tabeli 3. Najlepsze charakterystyki aerodynamiczne prezentował przypadek referencyjny (materiał nieprzepuszczalny). Niewiele gorsze właściwości aerodynamiczne prezentowała paralotnia pokryta tkaniną SKYTEX 27 CLASSIC 2. Średnie ciśnienie wewnątrz skrzydła wynosiło  $p=101415,80$  Pa; doskonałość aerodynamiczna 12.7708 była mniejsza o 0.398 niż dla przypadku referencyjnego. Paralotnia pokryta tkaniną PORCHER MARINE 9017 PU E38A (używana ponad 20 lat temu), prezentowała znacznie gorsze charakterystyki. Jej doskonałość aerodynamiczna była o 1.54 niższa, niż doskonałość skrzydła pokrytego materiałem nieprzepuszczającym powietrza. Jednak dla tych przypadków lot byłby stabilny i bezpieczny (rys. 5a-b). Stwierdzono występowanie znacznych spadków ciśnienia nad skrzydłem, co sprzyja wytwarzaniu siły nośnej. Ponadto średnie wartości ciśnienia wewnątrz omawianych paralotni znacznie przekraczały wartość ciśnienia atmosferycznego, a ich rozkłady były bardzo równomierne. Paralotnie pokryte takimi materiałami są w stanie utrzymać zaprojektowany kształt nawet przy małych podmuchach.



Rys. 4. – Otrzymane wyniki wizualne: A – skrzydło pokryte materiałem SKYTEX 27 CLASSIC 2; B – skrzydło pokryte materiałem PORCHER MARINE 9017 PU E38A, C – skrzydło pokryte materiałem SKYTEX 36 po degradacji hydrolityczno-mechanicznej.

*Źródło: opracowanie własne*

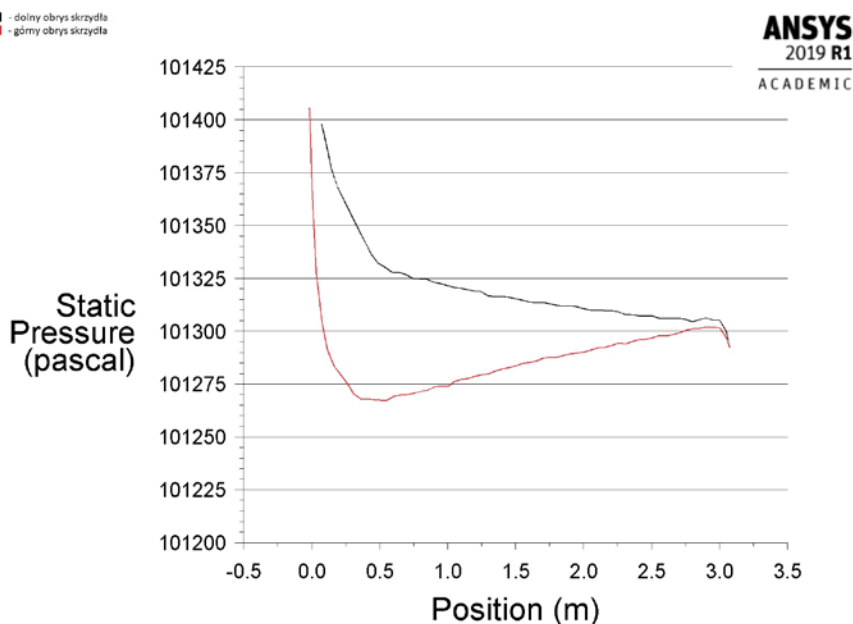
**Tabela 3.** Wartości liczbowe uzyskane w trakcie obliczeń numerycznych

PARAMETER	Materiał nieprzepuszczający powietrza	SKYTEX 27 CLASSIC 2	PORCHER MARINE 9017 PU E38A	SKYTEX 36 po degradacji hydrolityczno-mechanicznej
Średnie ciśnienie wewnątrz skrzydła paralotni	101415,83 Pa	101415,80 Pa	101412,6 Pa	101398,35 Pa
Masowe natężenie przepływu przez ścianki paralotni	0 kg/s	0,1280 kg/s	1,435 kg/s	5,8542 kg/s
Siła nośna	1101,96 N	1093,99 N	1085,883 N	812,2437 N
Siła oporu	83,6805 N	85,6634 N	93,4068 N	199,7884 N
Doskonałość aerodynamiczna	13,1687	12,7708	11,6253	4,0655

*Źródło: opracowanie własne*

Lot z użyciem skrzydła pokrytego tkaniną SKYTEX 36, po degradacji hydrolityczno-mechanicznej, byłby prawdopodobnie niemożliwy. Na podstawie rysunku 4c zauważono, że bardzo wysoka wartość ciśnienia po zewnętrznej stronie krawędzi natarcia zakłóciłaby proces tworzenia nadciśnienia wewnątrz skrzydła. Dla weryfikacji, porównano wyniki z wykresu rozkładu ciśnienia na górnej i dolnej powierzchni skrzydła (rys. 5), z wartościami z tabeli 3. Według wykresu, wzrost ciśnienia na nosku wynosi około  $101405 Pa$ , zaś średnie ciśnienie wewnątrz skrzydła w tym przypadku jest  $101398,35 Pa$  (patrz rys. 4c). Ciśnienie wewnątrz skrzydła było bardzo nierównomiernie rozłożone (rys. 4c); gdyby nawet paralotnia wzbijała się w powietrze, lot byłby skrajnie niebezpieczny a słaby wiatr zaburzyłby kształt aerodynamiczny.





Rys. 5. Wartości ciśnienia na górnej oraz dolnej powierzchni skrzydła, względem odległości od krawędzi natarcia

Źródło: opracowanie własne

## 7. Wnioski

Osiągi skrzydła pokrytego stosowanymi obecnie tkaninami impregnowanymi są nieznacznie gorsze od charakterystyk aerodynamicznych przypadku referencyjnego (materiał nieprzepuszczalny), natomiast paralotnia wykonana z materiału stosowanego w paralotniarstwie ok. 20 lat temu prezentuje już zauważalnie gorsze charakterystyki. Oznacza to, że nastąpił znaczący postęp w technologii produkcji i obróbki wykańczającej tkanin paralotni, mierzony znacznym wzrostem nieprzepuszczalności powietrza.

Bazując na wynikach dotyczących skrzydła pokrytego tkaniną poddaną degradacji można zauważyć, że starzenie się materiału ma wpływ na znaczące pogorszenie charakterystyk aerodynamicznych paralotni. Dlatego potencjalnymi szansami na poprawę właściwości tkanin paralotniowych będzie dążenie do zminimalizowania degradacji apretury/tkaniny w czasie eksploatacji.

Pożądane będzie także obniżenie masy powierzchniowej tkanin, co jest przydatne np. w para-alpinizmie (odmiana paralotniarstwa, w której użytkownik wspina się, a następnie dokonuje startu ze szczytów gór [3]). Nie może to odbyć się kosztem pogorszenia innych parametrów tkaniny (takich jak wytrzymałość, przepuszczalność powietrza), dlatego jest to ważne wyzwanie dla inżynierów włókiennictwa.

## **Literatura**

- [1] ANSYS, Inc, *ANSYS FLUENT User's Guide*, Canonsburg 2010.
- [2] ANSYS, Inc., *Introduction to ANSYS Meshing*, Canonsburg 2010.
- [3] **Dudek P., Włodarczak Z.**, *Paralotniarstwo*, Arete 2013.
- [4] **Maślanka P., Korycki R.**, *Textile Cover Effect on Aerodynamic Characteristics of a Paraglider Wing*, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe 2019, vol. 1, nr 133, ss. 78-83
- [5] **Menachem L.**, *Handbook of Fiber Chemistry*, International Fiber Science and Technology Series, 2006
- [6] Porcher Industries, *Porcher Industries develops cellulosic fibre reinforcements for composites*, Additives for Polymers 2011, vol. 2011, Issue 12, pp. 5-6.