

Research on the application of ecological nanomaterials in residential landscape design

Badania nad zastosowaniem ekologicznych nanomateriałów w projektowaniu krajobrazu mieszkalnego



DOI: 10.15199/62.2026.9.10

Nanocząstki Ag oraz materiały nanowłókniste z poli(alkoholu winylowego) otrzymano metodą elektroprzędzenia z układu zol-żel, a następnie zbadano ich właściwości antybakteryjne z zastosowaniem metodologii powierzchni odpowiedzi. Zoptymalizowano trzy główne parametry syntezy: stężenie Ag, napięcie pola elektrycznego oraz szybkość wtrysku. Ich wpływ zmniejszał się w kolejności: napięcie pola elektrycznego > stężenie Ag > szybkość wtrysku.

Słowa kluczowe: poli(alkohol winylowy), kompleks nanocząstek srebra, aktywność antybakteryjna

Ag nanoparticles and poly(vinyl alc.) nanofiber materials were prepared by electrospinning sol-gel system and studied for antibacterial properties by using response surface methodol. Three main synthesis parameters (Ag concn., electric field voltage and injection speed) were optimized. Their impact decreased in series: electric field voltage > Ag concn. > injection speed.

Keywords: poly(vinyl alcohol), nanosilver complex, antibacterial activity

Nanomateriały są nową klasą materiałów o szczególnych właściwościach, a ich pojawienie się otworzyło przed człowiekiem mezoskopowy obraz materii¹⁾. W porównaniu z materiałami tradycyjnymi wykazują one wiele nowych właściwości funkcjonalnych, dzięki czemu cieszą się dużym zainteresowaniem w środowisku naukowym. Nanomateriały można podzielić na różne grupy wymiarowe ze względu na ich wymiar przestrzenny. Gdy uzyskany materiał osiąga wymiar nanometryczny w jednym z wymiarów, uznaje się go za nanomateriał jednowymiarowy²⁾, dlatego materiały włókniste o średnicy w zakresie nanometrycznym określa się również mianem nanowłókien³⁾. Cieszą się one dużym zainteresowaniem w środowisku naukowym, ponieważ wykazują właściwości charakterystyczne dla nanomateriałów oraz charakteryzują się wieloma nowymi właściwościami funkcjonalnymi w porównaniu z materiałami tradycyjnymi⁴⁾. Przędzenie elektrostatyczne jest jedną ze skutecznych metod otrzymywania materiałów nanowłóknistych. W procesie tym można otrzymywać materiały włókniste o unikatowej strukturze, które znalazły częściowe zastosowanie w medycynie i biologii⁵⁾. Ponieważ materiały antybakteryjne otrzymywane techniką przędzenia elektrostatycznego mają wiele zalet w porównaniu z tradycyjnymi

Nano-materials are new materials with special properties, and their appearance has opened people's mesoscopic view of matter¹⁾. Compared with traditional materials, they show more new functional characteristics, thus attracting extensive attention in the research field. Nanomaterials can be divided into multiple dimensions by space angle. When the obtained material reaches nanometer level in one dimension, it is considered as one-dimensional nano-material²⁾, so fiber material with diameter in nanometer range is also called nano-fiber³⁾. Nano-fibers have attracted extensive attention in the research field because they have the relevant characteristics of nano-materials and show more new functional characteristics than traditional materials⁴⁾. Electrostatic spinning is one of the effective methods to prepare nano-fiber materials. Fiber materials with unique structures can be obtained through electrostatic spinning, which has been partially applied in the fields of medicine and biology⁵⁾. As antibacterial materials prepared by electrostatic spinning technology have many advantages such as higher liquid absorption⁶⁾, better air permeability⁷⁾, stronger controllability and biological simulation⁸⁾ compared with traditional antibacterial materials, so nanofiber materials by electrostatic spinning have gradually received widespread attention in the preparation of antibacterial materials, and the preparation of nanofiber antibacterial materials has also become a research hotspot⁹⁾.

* Address for correspondence/Adres do korespondencji:

Guangxi University of Science and Technology, Guangxi Liuzhou 545006, China,
e-mail: wangziwei8889@hotmail.com

cyjnymi materiałami antybakteryjnymi, takich jak większa zdolność pochłaniania cieczy⁶⁾, lepsza przepuszczalność powietrza⁷⁾, większa możliwość kontrolowania właściwości oraz lepsze odwzorowanie⁸⁾ warunków biologicznych, nanowłókniste materiały wytwarzane metodą przędzenia elektrostatycznego cieszą się coraz większym zainteresowaniem w zastosowaniach związanych z otrzymywaniem materiałów antybakteryjnych, a opracowywanie antybakteryjnych materiałów nanowłóknistych stało się również przedmiotem intensywnych badań⁹⁾.

Jako naturalny nieorganiczny środek antybakteryjny występujący w glebie, Ag może działać na ponad 650 rodzajów bakterii chorobotwórczych, a także wykazuje zdolność do zwalczania bakterii opornych, przy skuteczności antybakteryjnej przekraczającej 99,9%¹⁰⁾. Oprócz szerokiego spektrum działania antybakteryjnego środka antybakteryjne na bazie Ag charakteryzują się również wysokim poziomem bezpieczeństwa oraz długotrwałym działaniem antybakteryjnym¹¹⁾. W porównaniu z innymi materiałami zawierającymi metale ciężkie lub metale szlachetne, Ag może wykazywać właściwości antybakteryjne już przy bardzo małym stężeniu, co nie tylko wiąże się z mniejszą szkodliwością dla organizmu ludzkiego, lecz także pozwala uzyskać lepszy efekt antybakteryjny¹²⁾. Dlatego też wprowadzenie Ag do nanowłóknistych materiałów antybakteryjnych ma ogromne znaczenie¹³⁾. Nanocząstki srebra można otrzymywać metodą strącania z zastosowaniem poliwinylolopirolidonu (PVP)¹⁴⁾. Jednak ze względu na słabą zdolność wiązania metali z materiałami organicznymi opracowanie materiałów nanowłóknistych zawierających Ag o dobrej stabilności nadal stanowi jedno z wyzwań. Poli(alkohol winylowy) (PVA) jest rozpuszczalnym w wodzie polimerem otrzymywanym w wyniku hydrolizy poli(węglanu winylu), charakteryzującym się dobrymi właściwościami włóknotwórczymi, doskonałą przyczepnością oraz odpornością na działanie rozpuszczalników. Dlatego nanocząstki Ag i PVA można połączyć w nanowłóknisty kompozyt polimerowy metodą zol-żel, uzyskując w ten sposób antybakteryjny materiał nanowłóknisty Ag/PVA. Na podstawie metodologii powierzchni odpowiedzi systematycznie zbadano wpływ głównych parametrów procesu (stężenia Ag, napięcia pola elektrycznego oraz szybkości wtrysku) na właściwości antybakteryjne nanowłókien Ag/PVA, a następnie na podstawie wyników analizy powierzchni odpowiedzi zoptymalizowano proces otrzymywania antybakteryjnych materiałów nanowłóknistych Ag/PVA.

Część doświadczalna

Materiały

Analitycznie czysty azotan srebra dostarczyła firma Tianjin Tiangan Chemical Company, PVP otrzymano od China Medicine (Group) Shanghai Chemical Reagent Corp., PVA dostarczyła firma Shanghai Jinbaidi, a pozostałe substancje chemiczne (woda amoniakalna, kwas taninowy,

As a natural inorganic antibacterial agent from soil, Ag can act on more than 650 kinds of pathogenic bacteria, and it also has the ability to kill resistant bacteria, with an antibacterial rate of over 99.9%¹⁰⁾. In addition to broad-spectrum antibacterial properties, Ag antibacterial agents also have the characteristics of high safety and long antibacterial duration¹¹⁾. Compared with other heavy metal or precious metal materials, Ag can express antibacterial property even at a trace concentration, which not only has less harm to human body, but also can obtain better antibacterial effect¹²⁾. Therefore, it is of great significance to combine Ag into the preparation of nanofiber antibacterial materials¹³⁾. The silver nanoparticles can be produced by precipitation with polyvinylpyrrolidone (PVP)¹⁴⁾. However, because of weak binding ability of metal and organic materials, the development of Ag nanofiber materials with good stability is still one of the difficulties. Poly(vinyl alcohol) (PVA) is a water-soluble polymer obtained from hydrolysis of poly(vinyl carbonate) and has good fiber forming property, excellent adhesion and solvent resistance. Therefore, nano-Ag particles and PVA can be joined into nanofiber polymer composite by sol-gel method, so as to achieve the preparation of Ag/PVA nanofiber antibacterial material. Based on response surface methodology, effect of main process parameters (Ag concentration, electric field voltage and injection speed) on the antibacterial properties of Ag/PVA nano-fibers was systematically studied and the preparation process of Ag/PVA nano-fiber antibacterial materials was optimized according to the results of response surface analysis.

Experimental

Materials

Analytic reagent-grade silver nitrate was provided by Tianjin Tiangan Chemical Company, the PVP was obtained from China Medicine (Group) Shanghai Chemical Reagent Corp., the PVA was delivered by Shanghai Jinbaidi company, and other chemicals (ammonia water, tannic acid, sodium dodecyl sulfate (SDS) and acetone solvent) were purchased from commercial sources in China.

Methods

Precipitation of silver nanoparticles. *PVP (0.272 g) was dissolved in 90 mL deionized water and tannic acid solution (100 mL, 24 mmol/L) was added into 2 flasks and then stirred by magnetic force until the color of the mixed solution turned light yellow. Ammonia water was used to adjust the pH to 8. After 1 h long stirring, AgNO₃ solution (120 mmol/L) was slowly poured into both flasks until the color of the solution changed to brownish red. After 1 h long stirring, the quality of AgNO₃ was recorded. Finally, acetone (50 mL) was added to the mixed solution to precipitate the Ag nanoparticles, separated by centrifugation after standing for 0.5 h, and washed repeatedly*

dodecylsulfate sodium (SDS) oraz aceton jako rozpuszczalnik) zakupiono od dostawców komercyjnych w Chinach.

Metodyka badań

Otrzymywanie nanocząstek srebra metodą strącania. PVP (0,272 g) rozpuszczono w 90 mL wody dejonizowanej, a następnie do 2 kolb dodano roztwór kwasu taninowego (100 mL, 24 mmol/L) i mieszano na mieszadle magnetycznym do momentu, aż barwa mieszaniny zmieniła się na jasnożółtą. Wodę amoniakalną zastosowano do regulacji pH do wartości 8. Po 1 h mieszania do obu kolb powoli dodawano roztwór AgNO_3 (120 mmol/L), aż do momentu, gdy barwa roztworu zmieniła się na brunatnoczerwoną. Po 1 h mieszania odnotowano masę AgNO_3 . Na koniec do mieszaniny dodano aceton (50 mL) w celu wytrącenia nanocząstek Ag. Po 0,5 h pozostawiania mieszaniny w stanie spoczynku nanocząstki oddzielono przez wirowanie, a następnie wielokrotnie przemywano acetonem i wodą dejonizowaną do uzyskania pH 7. Osad suszono w suszarce próżniowej przez 24 h, otrzymując zmodyfikowane PVP nanocząstki Ag.

Przygotowanie roztworu przędzalniczego PVA zawierającego nanocząstki Ag. Najpierw przygotowano wodne roztwory PVA o różnym stężeniu (6–10% mas.). Przykładowo, w przypadku 8-proc. roztworu PVA 0,004 g SDS dodano do 20 mL wody destylowanej i rozpuszczono, mieszając na mieszadle magnetycznym, a następnie dodano PVA (1,60 g). Roztwór stopniowo ogrzewano do temp. 95–98°C, prowadzono kondensację i ogrzewanie pod chłodnicą zwrotną oraz mieszano na mieszadle magnetycznym przez 2 h, aż do uzyskania klarownego roztworu. Następnie przechowywano go w suszarce w temp. 60°C do dalszego użycia. Następnie do roztworu PVA dodawano zmodyfikowane PVP nanocząstki Ag w odpowiedniej proporcji stężeń, po czym poddawano je przez 0,5 h dyspergowaniu z wykorzystaniem mieszania magnetycznego wspomaganego ultradźwiękami. Tak przygotowaną mieszaninę AgNPs/PVA poddawano następnie przędzeniu elektrostatycznemu. Zmieniając stosunek stężenia Ag, można było otrzymać materiały AgNPs/PVA o różnych właściwościach.

Ocena właściwości antybakteryjnych. Właściwości antybakteryjne membrany nanowłóknistej AgNPs/PVA oceniano metodą absorpcyjną oraz metodą turbidymetryczną. Metoda absorpcyjna była półilościową metodą badawczą. Zgodnie z tą metodą próbkę kompozytowej włókniny nanowłóknistej AgNPs/PVA (15 mg) umieszczano w kolbie stożkowej o pojemności 50 mL i sterylizowano pod lampą ultrafioletową przez 5 h. Następnie za pomocą mikropipety pobierano 100 μL zawiesiny bakteryjnej i наносzono ją na badaną próbkę, po czym hodowano ją w inkubatorze o stałej temp. 37°C przez 10–12 h. Następnie wyhodowane bakterie wypłukiwano łącznie 4-krotnie, każdorazowo przy użyciu 20 mL podłoża płynnego, a uzyskany eluat dokładnie mieszano. Trzy próbki eluatu rozcieńczano w różnym stopniu, a następnie przenoszono na podłoże hodowlane i inkubo-

with acetone and deionized water to pH 7. The precipitate was dried in a vacuum drying oven for 24 h to obtain the PVP-modified Ag nanoparticles.

Preparation of PVA spinning solution of Ag nanoparticles. Firstly, PVA aqueous solutions with varying concentrations (6–10% by mass) were prepared. Taking 8% PVA solution as an example, 0.004 g SDS was added into 20 mL distilled water, magnetic stirring was used for dissolution, and then PVA (1.60 g) was added. The solution was gradually heated up to 95–98°C, condensed and refluxed, and stirred magnetically for 2 h until the solution became transparent, finally stored in a 60°C oven to reserve. Then the Ag nanoparticles modified by PVP were added to PVA solution according to the concentration ratio, dispersed for 0.5 h by magnetic stirring assisted ultrasound, and then the mixed AgNPs/PVA solution was undertaken to electrostatic spinning. By changing the Ag concentration ratio, AgNPs/PVA materials with different properties could be obtained.

Evaluation of antibacterial properties. The antibacterial properties of AgNPs/PVA nanofiber membrane were evaluated by absorption and turbidimetry methods. The absorption method was a semi-quantitative test method. According the method, a AgNPs/PVA composite nanofiber felt (15 mg) was added into a 50 mL conical flask, placed under the ultraviolet lamp for 5 h for sterilization, then 100 μL of bacterial suspension was taken by a micropipettor and inoculated on the tested sample, and cultured in a constant temperature incubator at 37°C for 10–12 h. Next, the cultured bacteria was eluted with 20 mL broth medium for 4 times in total, and the eluent was mixed evenly; three samples from the eluent were diluted according to different dilution times, and transferred to the medium to culture in a constant temperature incubator at 37°C for 10–12 h. After culturing, the colonies on the medium were counted by colony counter.

The turbidimetry method for determining the antibacterial property of AgNPs/PVA composite nanofiber materials was a qualitative test method. AgNPs/PVA composite nanofiber felt (5 mg) was cut into small pieces, added to 10 mL aseptic test tube, and sterilized by ultraviolet irradiation for 5 h. Then bacterial suspension (20 μL) was added to the test tube, as well as 4 mL broth medium. The broth medium mixed with bacterial suspension was cultured in a constant temperature shaking table at 37°C for 12 h, and finally the absorbance value of the sample was measured at 600 nm by ultraviolet spectrophotometer.

Response surface analysis method

Single factor test setting for antibacterial property Firstly, the Ag concentration, electric field voltage and injection speed were investigated to evaluate the antibacterial property of AgNPs/PVA nanopolymer matrix composite and the basic parameter range of synthetic materials can be determined through single factor test.

wano w inkubatorze o stałej temp. 37°C przez 10–12 h. Po zakończeniu hodowli kolonie na podłożu zliczano za pomocą licznika kolonii.

Metoda turbidymetryczna oznaczania właściwości antybakteryjnych kompozytowych materiałów nanowłóknistych AgNPs/PVA była metodą badania jakościowego. Kompozytową włókninę nanowłóknistą AgNPs/PVA (5 mg) pocięto na małe kawałki, umieszczono w probówce o pojemności 10 mL i sterylizowano przez 5 h poprzez naświetlanie promieniowaniem ultrafioletowym. Następnie do próbówki dodano zawiesinę bakteryjną (20 µL) oraz 4 mL podłoża płynnego. Podłoże płynne zmieszane z zawiesiną bakteryjną inkubowano w wytrząsarce o stałej temp. 37°C przez 12 h, a następnie za pomocą spektrofotometru UV zmierzono absorbancję próbki przy długości fali 600 nm.

Metoda analizy powierzchni odpowiedzi

Badanie jednoczynnikowe właściwości antybakteryjnych. W pierwszej kolejności zbadano wpływ stężenia Ag, napięcia pola elektrycznego oraz szybkości wtrysku na właściwości antybakteryjne nanopolimerowej matrycy kompozytowej AgNPs/PVA, a na podstawie badania jednoczynnikowego określono podstawowy zakres parametrów procesu otrzymywania materiałów. Poziomy czynników wybranych do badania jednoczynnikowego przedstawiono w tabeli 1.

Badanie właściwości antybakteryjnych metodą Boxa i Behnkena. Na podstawie wyników badań jednoczynnikowych jako zmienne dla modelu powierzchni odpowiedzi wybrano parametry mające największy wpływ na właściwości antybakteryjne: stężenie Ag (A), napięcie pola elektrycznego (B) oraz szybkość wtrysku (C). Poziomy zmiennych oznaczono jako -1, 0 i 1, a wartość przesunięcia danych przyjęto jako wartość odpowiedzi. Badanie metodą powierzchni odpowiedzi zaprojektowano z wykorzystaniem oprogramowania Design-Expert. Opracowano trójczynnikowy model powierzchni odpowiedzi na 3 poziomach, a parametry projektowe badania metodą Boxa i Behnkena przedstawiono w tabeli 2.

Wyniki badań i ich omówienie

Analiza badania jednoczynnikowego właściwości antybakteryjnych AgNPs/PVA

Badanie jednoczynnikowe przeprowadzone w celu analizy właściwości antybakteryjnych nanopolimerowych matryc kompozytowych Ag/PVA pod kątem 3 czynników: stężenia roztworu, napięcia pola elektrycznego oraz szybkości wtrysku, przyniosło zadowalające wyniki. Przedstawiono je na rysunku. Z rysunku wynika, że wraz ze wzrostem stężenia Ag liczba kolonii w podłożu hodowlanym najpierw malała, a następnie wzrastała. Przy stężeniu Ag wynoszącym 6% liczba kolonii była najmniejsza (0), ponieważ wraz ze wzrostem zawartości

Table 1. Single factor tests for antibacterial properties selection

Tabela 1. Dobór parametrów w badaniach jednoczynnikowych właściwości antybakteryjnych

No./Lp.	Ag concentration/ Stężenie Ag, %	Voltage/ Napięcie, V	Injection speed/ Szybkość wtrysku, mL/min
1	1	12	0.005
2	2	14	0.010
3	3	16	0.015
4	4	18	0.020
5	5	20	0.025
6	6	22	0.030
7	7	24	0.035

Table 2. Factors and levels of Box-Behnken test on antibacterial properties

Tabela 2. Czynniki i poziomy w badaniu metodą Boxa i Behnkena właściwości antybakteryjnych

No./Lp.	Ag concentration/ Stężenie Ag, %	Voltage/Napięcie, V	Injection speed/ Szybkość wtrysku, mL/min
-1	5	14	0.015
0	6	16	0.020
1	7	18	0.025

The single factor test level of selected factors was listed in Table 1.

Box-Behnken test on antibacterial property. According to the single factor test results, the levels that have great influence on antibacterial property, Ag concentration (A), electric field voltage (B) and injection speed (C) were selected as the variable values of response variables. The levels of variables were expressed as -1, 0, 1, and the data offset was taken as the response value. The response surface test was designed by using software Expert. A three-factor and three-level response surface model was established, and the design parameters of Box-Behnken test are shown in Table 2.

Results and discussion

Single factor test analysis of antibacterial properties of AgNPs/PVA

Single factor test conducted to analyze the antibacterial properties of Ag/PVA nanopolymer matrix composites from three aspects of solution concentration, electric field voltage and injection speed had good results. They are shown in Figure. From Figure a, it could be found that with the increase of the Ag concentration, the number of colonies in the culture medium decreased first and then increased. When the Ag concentration was 6%, the number of colonies was the lowest (0), because with the increase of Ag content, its antibacterial activity was the highest one. In the dispersed fiber structure, Ag nanoparticles could dissociate Ag⁺ so as to destroy enzyme protein molecules

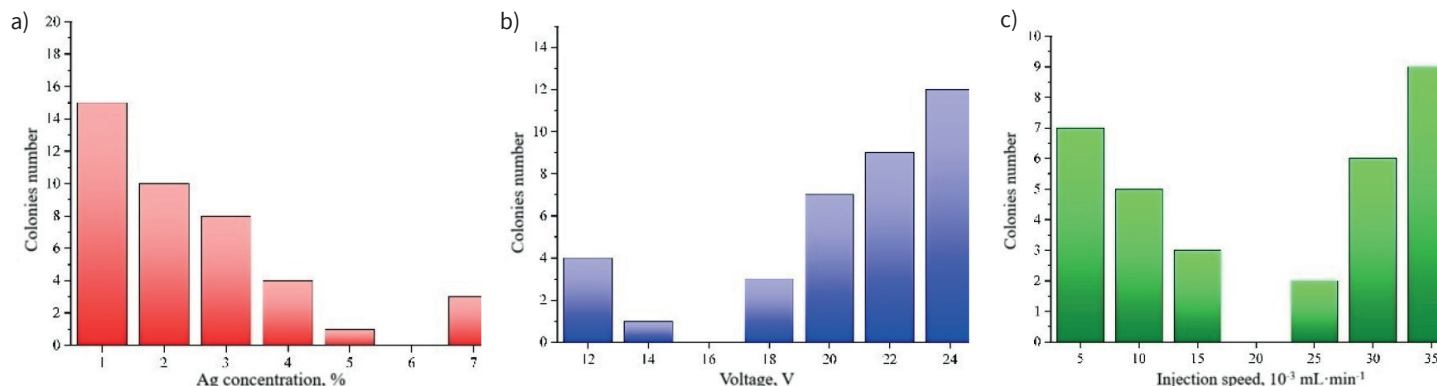


Figure. Changes in antibacterial properties of composites obtained with different parameters: a) Ag concentration, b) voltage, c) injection speed

Rysunek. Zmiany właściwości antybakteryjnych kompozytów otrzymanych przy zastosowaniu różnych parametrów: a) stężenia Ag, b) napięcia, c) szybkości wtrysku

Ag jego działanie antybakteryjne osiągało najwyższą skuteczność. W rozproszonej strukturze włókien nanocząstki Ag mogły uwalniać jony Ag^+ , które niszczyły cząsteczki białek enzymatycznych w bakteriach. Dlatego zwiększenie stężenia Ag może sprzyjać powstawaniu większej ilości jonów Ag^+ , a tym samym poprawiać właściwości antybakteryjne nanomateriałów. Jednak przy dalszym zwiększaniu zawartości Ag właściwości antybakteryjne nanomateriałów ulegały pogorszeniu, ponieważ podczas procesu otrzymywania nanocząstek Ag były one rozproszone we włóknach PVA. Gdy zawartość Ag wzrosła do pewnego poziomu, nanocząstki Ag rozproszone na powierzchni nie były już w stanie utworzyć skutecznego systemu antybakteryjnego i obserwowano ich agregację, co prowadziło do zmniejszenia efektywnego wykorzystania nanocząstek Ag. Dlatego dalsze zwiększanie zawartości Ag prowadziło do zmniejszenia właściwości antybakteryjnych.

Liczba kolonii w podłożu hodowlanym najpierw malała, a następnie wzrastała wraz ze zwiększaniem napięcia pola elektrycznego (rysunek b). Wynikało to z faktu, że po osiągnięciu napięcia wystarczającego do pokonania napięcia powierzchniowego roztworu powstawał stabilny strumień, co wskazywało na uzyskanie stabilnej średnicy włókien. Wraz ze wzrostem przyłożonego napięcia zwiększała się ilość ładunku elektrycznego na powierzchni strumienia, powodując wzrost ciśnienia, dzięki czemu można było otrzymywać włókna o mniejszej średnicy, co sprzyjało również rozproszeniu i adhezji cząstek Ag. Jednak przy dalszym zwiększaniu napięcia średnica włókien otrzymywanych metodą przędzenia elektrostatycznego nie mogła już ulegać dalszemu zmniejszeniu, lecz zaczynała wzrastać.

Jeśli chodzi o dobór szybkości wtrysku, z rysunku c wynika, że przy małej szybkości wtrysku podawanie roztworu do przędzenia elektrostatycznego było niewystarczające, dlatego próbka włóknista nie była łatwo rozciągana w celu utworzenia ciągłej i jednorodnej struktury. Natomiast przy dużej szybkości wtrysku podawanie roztworu do przędzenia elektrostatycznego było nadmierne, przez co w próbce włóknistej łatwo powstawała struktura z nagromadzonych

in bacteria. Therefore, the increase of Ag concentration can promote more Ag^+ formation and improve the antibacterial property of nanomaterials. However, with the further increase of Ag content, the antibacterial property of nanomaterials decreased, for the reason that Ag nanoparticles were dispersed in PVA fibers during the preparation process. When the Ag content increased to a certain extent, the Ag nanoparticles dispersed on the surface could not form an effective antibacterial system and an aggregate phenomenon was observed, which resulted in a decrease of effective utilization rate of Ag nanoparticles. Therefore, further increase of Ag content resulted in a decrease of antibacterial property.

The number of colonies in the culture medium first decreased and then increased with an increase of electric field voltage (Figure b), because when the voltage was high enough to overcome the effect of solution surface tension, a stable jet was formed, indicating that the obtained fiber structure had a stable diameter, while the higher the applied voltage was, the amount of net charge on the jet surface increased, resulting in the increase of pressure, and spinning fibers with smaller diameter could be prepared, which was also conducive to the dispersion and adhesion of Ag particles. However, as the voltage increased further, the diameter of electrospun fibers could not decrease further, but increased.

As for the selection of injection speed, it can be seen from Figure c that when the injection speed was slow, the supply of electrospinning solution was insufficient, so the fiber sample was not easy to be stretched to form a continuous and uniform structural system, while when the injection speed was fast, the supply of electrospinning solution was excessive, so the fiber sample was easy to form a stacked particle structure, which also resulted in a failure to form a uniform fibrous structural system.

Response surface analysis of antibacterial properties of AgNPs/PVA composite

In order to analyze the effect of solution concentration (A), electric field (B) voltage and injection

Table 3. Response surface variance analysis of antibacterial properties of materials

Tabela 3. Analiza wariancji powierzchni odpowiedzi właściwości antybakteryjnych materiałów

Source/Źródło	Sum of squares/ Suma kwadratów	df/Stopnie swobody	Mean square/ Średni kwadrat	F value/Wartość F	p-Value probe > F/ Wartość p – P > F
Model	30.2255	9	3.358389	54.10523	< 0.0001
A-A	0.36125	1	0.36125	5.819908	0.0466
B-B	0.66125	1	0.66125	10.65305	0.0138
C-C	0.18	1	0.18	2.899885	0.1324
AB	0.7225	1	0.7225	11.63982	0.0113
AC	0.25	1	0.25	4.027618	0.0848
BC	0.81	1	0.81	13.04948	0.0086
A^2	5.887605	1	5.887605	94.8521	< 0.0001
B^2	11.91918	1	11.91918	192.0237	< 0.0001
C^2	6.658132	1	6.658132	107.2656	< 0.0001
Residual/Pozostałość	0.4345	7	0.062071		
Lack of fit/Brak dopasowania	0.3825	3	0.1275	9.807692	0.0258
Pure error/Czysty błąd	0.052	4	0.013		
Cor total/Całkowita suma kwadratów skorygowana	30.66	16			

cząstek, co również uniemożliwiało utworzenie jednorodnej struktury włóknistej.

Analiza powierzchni odpowiedzi właściwości antybakteryjnych kompozytu AgNPs/PVA

W celu przeanalizowania wpływu stężenia roztworu (A), napięcia pola elektrycznego (B) oraz szybkości wtrysku (C) na właściwości antybakteryjne nanopolimerowych matryc kompozytowych Ag/PVA, a następnie dalszej optymalizacji parametrów syntezy, opracowano trójczynnikiowy model analizy powierzchni odpowiedzi na 3 poziomach. Wyniki przedstawiono w tabeli 3. Równanie modelu regresji między każdym czynnikiem a wartością odpowiedzi zostało opisane równaniem (1):

$$R = 0,36 - 0,21A - 0,29B + 0,15C - 0,43AB - 0,25AC - 0,45BC + 1,18A^2 + 1,68B^2 + 1,26C^2 \quad (1)$$

Wartość p dla modelu wynosi 0,0258, co wskazuje, że opracowany w ten sposób model regresji jest istotny statystycznie; współczynnik determinacji modelu regresji wynosi 0,9858, co wskazuje, że wpływ warunków syntezy na właściwości antybakteryjne nanomateriałów można przewidywać za pomocą tego modelu; wartość p dla składnika kwadratowego modelu jest mniejsza niż 0,01, co wskazuje, że wpływ 3 czynników na właściwości antybakteryjne nanomateriałów jest wysoce istotny statystycznie ($p < 0,01$). Świadczy to również o tym, że między poszczególnymi czynnikami mogą występować interakcje, a ich zależność nie ma charakteru wyłącznie liniowego; wpływ poszczególnych czynników na wartość odpowiedzi można ocenić na podstawie wartości F w analizie wariancji. Im większa wartość F , tym bardziej istotny jest wpływ danego czynnika na wartość odpowiedzi. Zatem kolejność wpływu wybranych czynników na wynik badania jest następująca: napięcie pola elektrycznego > stężenie Ag > szybkość wtrysku.

tion speed (C) on the antibacterial properties of Ag/PVA nano-polymer matrix composites, and further optimize the synthesis parameters, a three-factor and three-level response surface analysis model was established, and its results are shown in Table 3. The regression model equation between each factor and response value was described by equation (1):

$$R = 0,36 - 0,21A - 0,29B + 0,15C - 0,43AB - 0,25AC - 0,45BC + 1,18A^2 + 1,68B^2 + 1,26C^2 \quad (1)$$

The p -value of the model is 0.0258, which indicates that the regression model established by this method is significant; the decision coefficient of the regression model is 0.9858, indicating that the influence of synthesis conditions on the antibacterial properties of the nano-materials can be predicted by this model; the p -value of the quadratic term in the model is less than 0.01, so the influence of the three indexes on the antibacterial properties of the nano-materials is extremely significant ($p < 0.01$), which also shows that there may be interaction between different factors, not a single linear relationship; the influence of each factor on the response value can be evaluated by the F value in the variance analysis, the greater the F value, the more significant the influence on the response value, so the order of influence of the selected factors on the test accuracy is: electric field voltage (B) > solution concentration (A) > injection speed (C).

Conclusion

Electrostatic spinning technology was successfully applied for preparation of antibacterial Ag/PVA nano-fibers. The antibacterial properties of the nano-fiber materials were systematically studied. Three factors

Technologię przędzenia elektrostatycznego z powodzeniem zastosowano do otrzymywania antybakteryjnych nanowłókien Ag/PVA. Przeprowadzono systematyczne badania właściwości antybakteryjnych otrzymanych materiałów nanowłóknistych. Trzy czynniki miały istotny wpływ na właściwości antybakteryjne, a mianowicie: stężenie roztworu, napięcie pola elektrycznego oraz szybkość wtrysku. Czynniki te wytypowano w celu określenia ich wpływu. Ich wpływ był największy w następującej kolejności: napięcie pola elektrycznego (B) > stężenie roztworu (A) > szybkość wtrysku (C). Przy stężeniu roztworu wynoszącym 6%, napięciu pola elektrycznego 16 V oraz szybkości wtrysku 0,020 mL/min metodą zol-żel otrzymano nanowłókna Ag/PVA o najlepszych właściwościach antybakteryjnych. W podłożu hodowlanym nie zaobserwowano wyraźnego wzrostu kolonii.

Podziękowania

Niniejsza praca została sfinansowana w ramach projektu „Podnoszenie podstawowych zdolności badawczych młodych pracowników naukowych na uniwersytetach w Guangxi w 2021 roku”, projektu „Zastosowanie procesu artystycznego emaliowania kolorowego w badaniach nad ceramiką z Guangxi” oraz projektu „Nauki humanistyczne i społeczne”, nr 2021KY0327.

had important influence on the antibacterial properties, namely solution concentration, electric field voltage and injection speed. They were screened to determine their effect. They depended mostly on electric field voltage (B) > solution concentration (A) > injection speed (C). When the solution concentration was 6%, electric field voltage 16 V, and injection speed 0.020 mL/min, the Ag/PVA nanofibers with best antibacterial properties were obtained by sol-gel method, and no obvious colony growth was found in the culture.

Acknowledgments

This paper is supported by project of improvement of basic ability of scientific researching in young mentors in Guangxi's universities in 2021, Enameled color art process in applied research in Guangxi earthenware, Humanities and social science 2021KY0327.

Received/Otrzymano:

19-06-2025

Accepted/Zaaakceptowano:

21-08-2026

Reviewed/Zrecenzowano:

30-09-2025

Published/Opublikowano:

17-09-2026

REFERENCES/LITERATURA

- [1] L. Cao, M.J. Meziani, S. Sahu, Y. Sun, *Acc. Chem. Res.* 2013, **469**, No. 1, 171.
- [2] Z. Fan, B. Liu, J. Wang, S. Zhang, Q. Lin, P. Gong, L. Ma, S. Yang, *Adv. Funct. Mater.* 2014, **24**, No. 25, 3933; doi: 10.1002/adfm.201304202.
- [3] J. Chen, D. Wei, W. Gong, A. Zheng, Y. Guan, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2018, **10**, No. 43, 37535, doi.org/10.1021/acsami.8b14238.
- [4] C. Zhang, K. Liang, D. Zhou, H. Yang, X. Liu, X. Yin, W. Xu, Y. Zhou, P. Xiao, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2018, **10**, No. 33, 27692, doi.org/10.1021/acsami.8b09026.
- [5] H. Hu, X. Zhong, S. Yang, H. Fu, *Composites Part B: Eng.* 2020, **182**, 107623, doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107623.
- [6] S. Chen, M. Zhang, X. Shao, X. Wang, L. Zhang, P. Xu, W. Zhong, L. Zhang, M. Xing, L. Zhang, *J. Mater. Chem. B* 2015, **3**, No. 33, 6798, doi.org/10.1039/c5tb00842e.
- [7] J.S. Gonzalez, L.N. Luduena, A. Ponce, V.A. Alvarez, *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.* 2014, **34**, No. 1, 54, doi: 10.1016/j.msec.2013.10.006.
- [8] M.A. Issa, Z.Z. Abidin, S. Sobri, S. Rashid, M.A. Mahdi, N.A. Ibrahim, M.Y. Pudza, *Nanomaterials* 2019, **9**, No. 10, 1500, doi.org/10.3390/nano9101500.
- [9] R. Li, J. Lin, Y. Fang, C. Yu, J. Zhang, Y. Xue, Z. Liu, J. Zhang, C. Tang, Y. Huang, *Ceram. Intern.* 2018, **44**, No. 18, 22439, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.09.011.
- [10] U. Mizerska, R. Halasa, K. Turecka, J. Chojnowski, P. Pospiech, W. Fortuniak, S. Slomkowski, T. Makowski, W. Machnowski, P.J. Sowinski, *J. Mater. Sci.* 2018, **53**, No. 10, 7125, doi: 10.1007/s10853-018-2084-z.
- [11] J.L. Holloway, A.M. Lowman, G.R. Palmese, *Soft Matter* 2012, **9**, No. 3, 826, doi: 10.1039/C2SM26763B.
- [12] C. Chen, Y. Zhu, H. Bao, P. Zhao, H. Jiang, L. Peng, X. Yang, C. Li, *Soft Matter* 2011, **7**, No. 3, 915, doi: 10.1039/c0sm00923g.
- [13] Y. Wang, Y. Xue, J. Wang, Y. Zhu, Y. Zhu, X. Zhang, J. Liao, X. Li, X. Wu, Y. Qin, W. Chen, *Polymers* 2019, **11**, No. 7, 1112, doi.org/10.3390/polym11071112.
- [14] H. Wang, X. Qiao, J. Chen, X. Wang, Sh. Ding, *Mater. Chem. Phys.* 2005, **94**, No. 2–3, 449, doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.05.005.