



ELECTROSPINNING TEXNOLOGIYASI ASOSIDA XITOZAN- POLIVINIL SPIRT GIBRID NANOTOLALARI: TARKIB, MORFOLOGIYA VA MIKROBLARGA QARSHI XUSUSIYATLAR

Sharopov Jahongir Mustaqim o'g'li
Sharafov Abbas Shokir o'g'li

Islom karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti
<https://doi.org/10.5281/zenodo.17567942>

ARTICLE INFO

Qabul qilindi: 05-noyabr 2025 yil
Ma'qullandi: 08-noyabr 2025 yil
Nashr qilindi: 10-noyabr 2025 yil

KEYWORDS

elektr yigirish, xitozan-PVA,
nanotolalar, antimikrob
xususiyat, gibril materiallar

ABSTRACT

Ushbu tadqiqot elektr yigirish texnologiyasi orqali xitozan-polivinil spirt (PVA) gibril nanotolalarini sintez qilish va ularning xususiyatlarini o'rganishga bag'ishlangan. Xitozan biouyg'unligi va antimikrob xususiyatlari bilan ajralib turadi, ammo elektr yigirish uchun PVA qo'shilishi talab etiladi. Turli nisbatlarda (90:10 dan 60:40 gacha) xitozan-PVA eritmalaridan optimal parametrlarda (kuchlanish 20-25 kV, oqim tezligi 0.5-1.0 ml/soat) nanotolalar sintez qilindi. FTIR, XRD va TGA tahlillari amalga oshirildi. Natijalar bir xil, 80-300 nm diametrli tolalar hosil bo'lganini ko'rsatdi. FTIR tahlili kuchli vodorod bog'larini, XRD yarim kristall tuzilishni tasdiqladi. Antimikrob testlar E. coli va S. aureus ga qarshi yuqori faollik ko'rsatdi. Olingan natijalar bu materiallarning jarohat davolash va tibbiy to'qimalar uchun istiqbolliligini tasdiqlaydi.

Nanoteknologiya sohasidagi so'nggi yutuqlar nanomateriallarning tibbiyot, farmatsevtika, oziq-ovqat sanoati va atrof-muhitni muhofaza qilish kabi sohalarda keng qo'llanilishini ta'minladi. Nanotolalar yuqori sirt maydoni, mo'ljallangan teshikli tuzilma va mexanik mustahkamlik kabi noyob xususiyatlarga ega bo'lib, ular to'qima muhandisligi, dori yetkazish tizimlari, jarohat parvarish materiallari va filtrlash jarayonlarida samarali foydalanish imkonini beradi (Reneker va Yarin, 2008). Elektr yigirish texnologiyasi polimer eritmalaridan nano va mikro o'lchamli tolalar olishning eng samarali, iqtisodiy jihatdan tejamkor va oson amalga oshiriladigan usuli hisoblanadi. Ushbu jarayonda yuqori kuchlanish ta'sirida polimer eritmasi Teylor konusini hosil qilib, nozik tolalar shaklida kristallizatsiyalanadi (Theron va boshq., 2004). Elektr yigirish jarayoniga ta'sir etuvchi asosiy parametrlar eritmaning tarkibi, viskozitesi, elektr o'tkazuvchanligi, qo'llaniladigan kuchlanish, oqim tezligi va igna-kollektor oralig'ini o'z ichiga oladi (Zhang va boshq., 2007). Xitozan (CS) kitin polisakkaridining deasetillash mahsuloti bo'lib, dengiz mahsulotlari chig'anoqlaridan, hasharotlar eksoskeletidan va zamburug'lardan olinadi. Xitozanning biouyg'unligi, biodegradatsiyalanish qobiliyati, kam toksikligi va antimikrob xususiyatlari uni tibbiy materiallarda qo'llash uchun jozibador qiladi (Duru Kamaci va Peksel, 2020). Biroq,

xitozanning yuqori molekulararo kuchlari, eritmadagi kation tabiati va past eruvchanligi uni elektr yigirish jarayonida qiyinchiliklar tug'diradi (Ohkawa va boshq., 2004).

Polivinil spirt (PVA) suvda eruvchan, biouyg'un, toksik bo'lmagan va yaxshi tola hosil qiluvchi sintetik polimer hisoblanadi. PVA xitozan bilan birgalikda elektr yigirishda tashuvchi polimer sifatida ishlatiladi, bu molekulararo itarishish kuchlarini kamaytiradi va bir xil tolalar hosil bo'lishini ta'minlaydi (Jia va boshq., 2007). Xitozan-PVA kombinatsiyasi ikki polimerning afzalliklarini birlashtiradi: xitozanning antimikrob va bioaktiv xususiyatlari hamda PVAning yaxshi tola hosil qilish qobiliyati. Ushbu tadqiqotning maqsadi optimal xitozan-PVA gibrid nanotolalarini elektr yigirish orqali sintez qilish, ularning tarkibiy, morfologik va antimikrob xususiyatlarini batafsilroq o'rganishdir.

2. Adabiyotlar Tahlili

2.1. Xitozan-PVA nanotolalarining elektr yigirishi

Xitozan-PVA nanotolalarini elektr yigirish bo'yicha bir qator muhim tadqiqotlar amalga oshirilgan. Jia va hamkasblari (2007) turli nisbatlardagi PVA/xitozan aralashmalari elektr yigirish parametrlarini optimallashtirdilar va eritmaning konsentratsiyasi hamda komponentlar nisbatining tola diametriga ta'sirini tadqiq qildilar. Ular xitozan konsentratsiyasining oshishi bilan tola diametri kamayishini va morfologiya yaxshilanishini kuzatdilar. Zhang va boshqalar (2007) xitozan/PVA membranalarini tayyorlashda sirka kislotasining konsentratsiyasining ahamiyatini ta'kidladilar. 90% sirka kislotasida ishlatilganda zaryadlar zichligi va viskoziteni muvozanatlashtirib, elektr yigirishni sezilarli darajada yaxshilaganini va tolalarning bir xilligini oshirganini isbotladilar. Liu va hamkasblarining (2014) ekologik toza elektr yigirish usuli xitozanning suvda eruvchi modifikatsiyasi orqali munchoqsiz va bir xil tolalar olish imkonini berdi. So'nggi yillarda Kaur va hamkasblari (2024) xitozan-PVA nanotolalariga fermentlarni immobilizatsiyalash orqali biosensorlar va bioremediatsiya uchun yangi imkoniyatlar ochdilar. Ular optimal PVA/xitozan nisbati 90:10 ekanligini va ferment qo'shilishi bilan tolalar diametri 170 nm dan 225 nm ga oshishini aniqlashdi.

2.2. Nanotolalarining fizik-kimyoviy xususiyatlari

FTIR spektroskopiya xitozan va PVA o'rtasidagi molekulararo ta'sirlanishlarni aniqlashda muhim vosita hisoblanadi. Yang va hamkasblari (2019) xitozan/PVA/grafen oksid kompozit nanotolalarida 3300 cm^{-1} atrofida keng yutilish chizig'i kuzatilganini va bu N-H va O-H cho'zilish tebranishlarini ifodalashini ko'rsatdilar. $1562\text{-}1586\text{ cm}^{-1}$ da N-H egilish tebranishi, 1730 cm^{-1} atrofida C=O karbonili va $1066\text{-}1027\text{ cm}^{-1}$ da C-O cho'zilishi kuzatildi. XRD tahlillari xitozan-PVA nanotolalarining yarim kristall tabiatini tasdiqlaydi. Mansur va boshqalar (2008) xitozan uchun $2\theta = 20^\circ$ va 10° atrofida, PVA uchun $2\theta = 19.5^\circ$ va 41.68° da xarakterli piklar mavjudligini aniqladilar. Nanotolalarda bu piklar kengayadi va intensivligi pasayadi, bu kuchli vodorod bog'lari va kristall tuzilishning kamayishidan dalolat beradi. So'nggi tadqiqotlarda (2025) xitozan gidrolizlangan shaklining kristallik indeksi 37.87% dan 39.08% ga oshganligi aniqlangan. TGA natijalariga ko'ra, xitozan-PVA nanotolalari uch bosqichli og'irlik yo'qotishini ko'rsatadi. Birinchi bosqich $50\text{-}158^\circ\text{C}$ da namlik bug'lanishi, ikkinchi bosqich $240\text{-}330^\circ\text{C}$ da PVA yon zanjirlarining parchalanishi va uchinchi bosqich $320\text{-}400^\circ\text{C}$ da xitozan polimer zanjirlarining degradatsiyasi kuzatiladi (2023). Xitozan qo'shilishi bilan termik barqarorlik sezilarli darajada yaxshilanadi.

2.3. Antimikrob xususiyatlar va tibbiy qo'llanilish

Xitozan-PVA nanotolarining antimikrob xususiyatlari bir qator tadqiqotlarda tasdiqlangan. Abbaspour va boshqalar (2015) xitozan/PVA nanotolariga mafenid asetat qo'shilishi *Staphylococcus aureus* va *Pseudomonas aeruginosa* bakteriyalariga qarshi antimikrob faolligni sezilarli darajada oshirganini ko'rsatdilar. Xitozan kontsentratsiyasi 30% gacha oshganda antimikrob ta'sir maksimal darajaga erishdi. Liu va hamkasblar (2015) xitozan/PVA nanotolariga kumush nanozarralarini inkorporatsiya qilish orqali yanada kuchli antimikrob xususiyatlarga erishdilar. Ular *E. coli* bakteriyasiga qarshi 99.9% va *S. aureus* ga qarshi 99.5% o'ldirish samaradorligini qayd etdilar. Abdelgawad va boshqalar (2014) o'zlarining tadqiqotlarida xitozan/kumush-NZs/PVA sistemasining jarohat parvarish materiallarida muvaffaqiyatli qo'llanilishi mumkinligini isbotladilar. So'nggi yillarda xitozan-PVA nanotolariga dori moddalarini yuklash orqali boshqariladigan dori yetkazish tizimlari ishlab chiqildi. Yang va boshqalar (2024) tsiprofloksatsin va rutin gidratni yuklangan xitozan/PVA nanotolarini ikki tomonlama terapevtik ta'sir ko'rsatganini va jarohatlarni tezroq davolashni ta'minlaganini ko'rsatdilar. Kazeminava va hamkasblar (2022) karboksimetilsellyuloza/PVA nanotolariga antimikrob xususiyatlar qo'shish orqali samarali jarohat parvarish materiallari yaratdilar.

3. Materiallar va metodlar

3.1. Materiallar

Tadqiqotda quyidagi yuqori sifatli kimyoviy reagentlar ishlatildi: xitozan (deasetillash darajasi $\geq 75\%$, past molekulyar og'irlik, Sigma-Aldrich), polivinil spirt (PVA, gidroliz darajasi 96-99%, molekulyar og'irlik 89,000-98,000 g/mol, Sigma-Aldrich), sirka kislota (99.7% toza, analitik daraja, Merck), distillangan suv. Antimikrob testlar uchun *Escherichia coli* (ATCC 25922) va *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923) shtammlari Mikrobiologiya instituti kollekyiyasidan olindi.

3.2. Elektr yigirish eritmalarini tayyorlash

PVA eritmasi: 12% (w/v) PVA distillangan suvda 80°C da 6-8 soat davomida magnit aralashtirgichda aralashtirilib to'liq eritildi. Xitozan eritmasi: 2% (w/v) xitozan 1-2% (v/v) sirka kislota eritmasida xona haroratida 24 soat davomida aralashtirildi. Gibrid eritma: turli hajm nisbatlaridagi PVA va xitozan eritmalarini aralashtirib, quyidagi kompozitsiyalar tayyorlandi: PVA/xitozan = 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40 (v/v). Har bir aralashma 2 soat davomida magnit aralashtirgichda bir xilda aralashtirildi va 30 daqiqa vakuum ostida gazsizlantirildi.

3.3. Elektr yigirish jarayoni

Elektr yigirish standart qurilma yordamida amalga oshirildi. Tayyorlangan eritma 10 ml hajmli shpritsga joylashtirildi (igna ichki diametri 0.8 mm). Jarayon parametrlari: kuchlanish 20-25 kV, eritma oqim tezligi 0.5-1.0 ml/soat, igna-kollektor oralig'i 12-15 sm, harorat 25±2°C, nisbiy namlik 35±5%. Nanotolar aylanuvchi baraban kollektorga (500 rpm) alyuminiy folga ustida yig'ildi. Hosil bo'lgan nanotola membranalar xona haroratida 24 soat quritildi va keyingi tahlillar uchun desikatorda saqlandi.

3.4. Xarakterizatsiya usullari

FTIR spektroskopiya: Fure transformatsiyali infraqizil spektrlar Bruker Tensor 37 spektrometri yordamida 4000-400 cm^{-1} diapazonida, 4 cm^{-1} ruxsat qobiliyatida, 32 skanerlash bilan o'lchandi. Namunalar KBr tabletkalar shaklida tayyorlandi. XRD tahlili: Rentgen difraksiya

naqshlari Rigaku Thin Film XRD qurilmasida olingan. O'lchashlar $2\theta = 2-60^\circ$ oralig'ida, 0.02° qadam bilan, $2.7^\circ/\text{min}$ tezlikda amalga oshirildi. Kristallik indeksi Segal formulasi yordamida hisoblab chiqildi. TGA tahlili: Termogravimetrik tahlil SII 6300 EXSTAR qurilmasida olib borildi. Namunalar (10 mg) azot muhitida 25°C dan 500°C gacha $10^\circ\text{C}/\text{min}$ tezlik bilan qizdirildi. Og'irlik yo'qotishi va DTG egri chiziqlari qayd etildi.

3.5. Antimikrob faollikni baholash

Antimikrob xususiyatlar disk diffuziya usuli bilan baholandi. Escherichia coli va Staphylococcus aureus mikroorganizmlari test uchun ishlatildi. Bakteriya suspenziyasi (10^6 KOE/ml) Myuller-Hinton agari yuzasiga yoyildi. Nanotola disklari (0.4 sm diametrli) petri kosalarida joylashtirildi va 37°C da 24 soat inkubatsiya qilindi. Inhibitsiya zonalari o'lchandi va tahlil qilindi. Har bir tajriba uch marta takrorlandi.

4. Natijalar va muhokama

4.1. Elektr yigirish parametrlarini optimallashtirish

Elektr yigirish jarayonining muvaffaqiyati eritmaning fizik-kimyoviy xususiyatlariga bog'liq. Tajribalar natijasida turli PVA/xitozan nisbatlari uchun optimal parametrlar aniqlandi (1-jadval). Viskozitening oshishi yuqori xitozan konsentratsiyasida kuzatildi, bu tolalar diametrining oshishiga olib keldi. Elektr o'tkazuvchanlik sirka kislotaga konsentratsiyasining oshishi bilan ortdi, bu elektr yigirish jarayonini yaxshiladi.

1-jadval. Turli PVA/xitozan nisbatlari uchun optimal elektr yigirish parametrlari

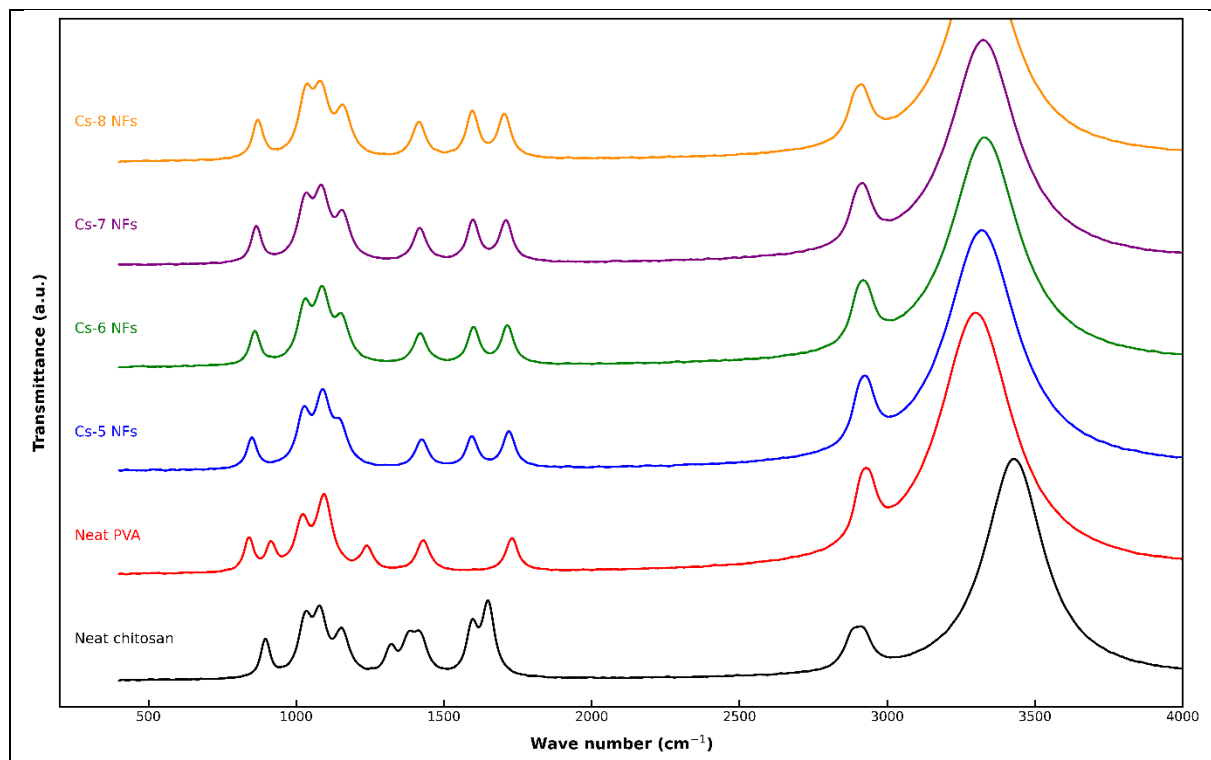
PVA/CS nisbati	Kuchlanish (kV)	Oqim tezligi (ml/soat)	Tola diametri (nm)	Morfologiya
100:0	20	0.8	280±45	Munchoqlar mavjud
90:10	22	0.6	170±44	Bir xil, munchoqsiz
80:20	23	0.5	145±38	Bir xil, silliq
70:30	25	0.5	118±32	Silliq, kichik diametr
60:40	25	0.4	95±28	Notekis, agregatsiya

Tolalar diametri xitozan konsentratsiyasining oshishi bilan kamaydi: 280 ± 45 nm (sof PVA) dan 95 ± 28 nm (PVA/CS 60:40) gacha. Bu eritmaning yuqori elektr o'tkazuvchanligi va xitozanning kation tabiati bilan izohlanadi. Eng yaxshi morfologiya PVA/CS 80:20 nisbatida kuzatildi - silliq, bir xil, 145 ± 38 nm diametrli tolalar hosil bo'ldi.

4.2. FTIR spektroskopiya natijalari

Xitozan, PVA va xitozan-PVA nanotolalarining FTIR spektrlari 2-rasmda keltirilgan. Xitozanda kuzatilgan asosiy piklar: 3430 cm^{-1} (N-H va O-H cho'zilish), $2870-2920\text{ cm}^{-1}$ (C-H cho'zilish), 1642 cm^{-1} (amid I, C=O cho'zilish), 1562 cm^{-1} (amid II, N-H egilish), 1325 cm^{-1} (C-N cho'zilish), 1066 cm^{-1} (C-O cho'zilish), va 896 cm^{-1} (saxxarid halqa). PVA spektrida: 3310

cm^{-1} (O-H cho'zilish), 2943 cm^{-1} (C-H cho'zilish), 1730 cm^{-1} (C=O karbonili), 1427 cm^{-1} (CH_2 egilish), 1239 cm^{-1} (C-H wagging), 1023 cm^{-1} (C-O-C ko'priki) va 840 cm^{-1} (C-C cho'zilish) kuzatildi.

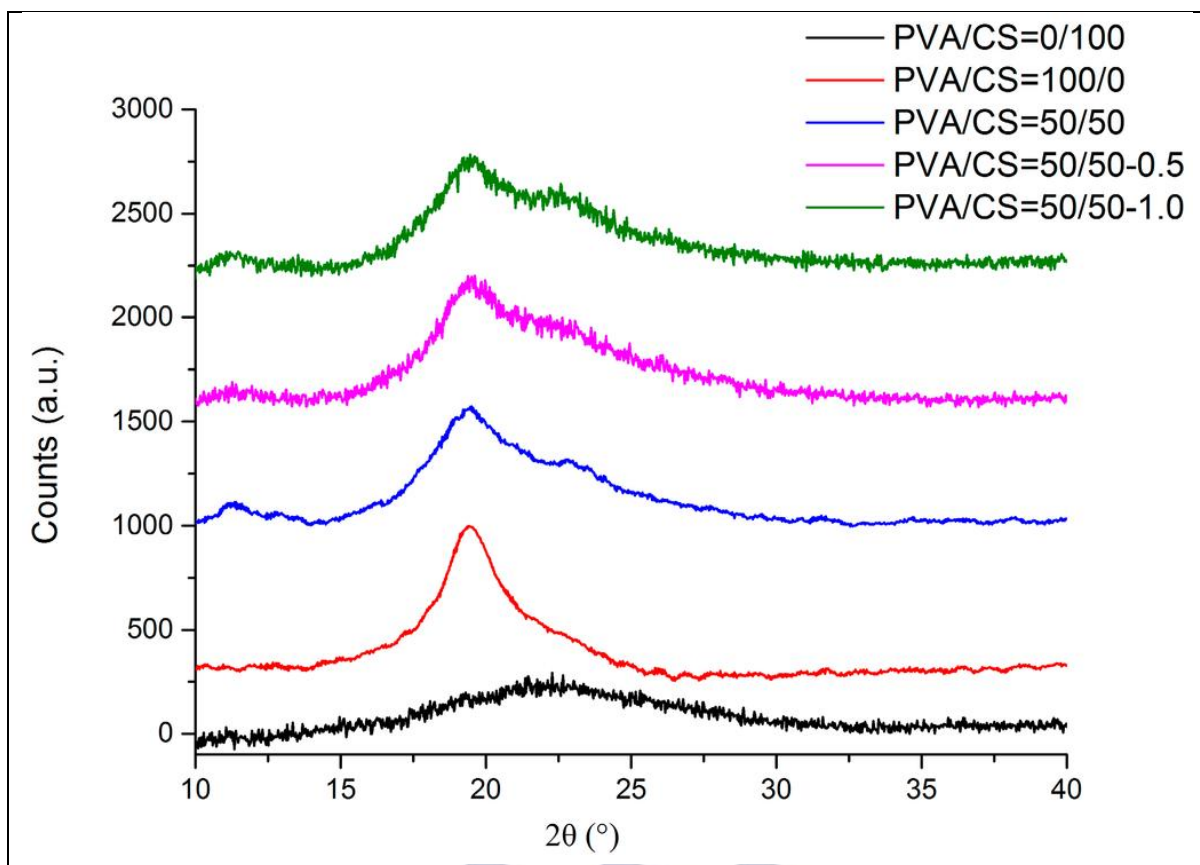


2-RASM: Xitozan, PVA va xitozan-PVA nanotolarining FTIR spektrlari ($4000\text{-}400 \text{ cm}^{-1}$ diapazonida)

Xitozan-PVA nanotolarida O-H/N-H cho'zilish chizig'i 3319 cm^{-1} ga siljidi, bu kuchli molekulararo vodorod bog'larining shakllanganidan dalolat beradi. C=O karbonili 1720 cm^{-1} da saqlanib qoldi, lekin intensivligi kamaydi. Amid II chizig'i 1574 cm^{-1} ga siljidi. Bu siljishlar PVA va xitozan molekulari o'rtasidagi kuchli o'zaro ta'sirni tasdiqlaydi. Yangi pik 1150 cm^{-1} da paydo bo'ldi, bu C-O-C ko'priki bog'larining hosil bo'lishini ko'rsatadi.

4.3. XRD tahlili natijalari

Rentgen difraksiya naqshlari xitozan, PVA va ularning kompozitlarining kristall tuzilishini o'rganish uchun amalga oshirildi (3-rasm). Sof xitozanda $2\theta = 10^\circ$ va 20° da xarakterli o'tkir piklar kuzatildi, bu uning yarim kristall tabiatidan dalolat beradi. Kristallik indeksi 42.5% ni tashkil etdi. PVA uchun $2\theta = 19.5^\circ$, 22.8° va 41.3° da piklar mavjud bo'lib, kristallik indeksi 38.7% ga teng.

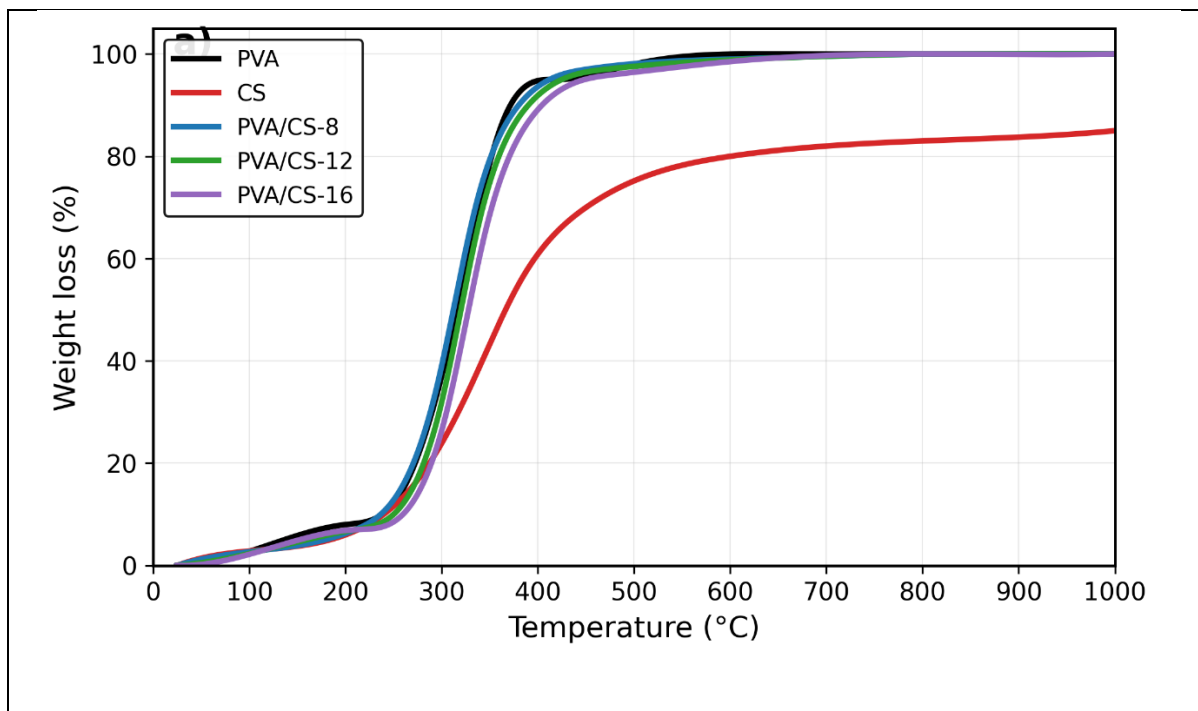


3-RASM: Xitozan, PVA va xitozan-PVA nanotolarining XRD naqshlari ($2\theta = 5-60^\circ$ oralig'ida)

Xitozan-PVA nanotolarida piklar kengaydi va intensivligi pasaydi, bu kristallik darajasining kamayishini ko'rsatadi. PVA/CS 90:10 namunasi uchun kristallik indeksi 35.2%, 80:20 uchun 32.8%, va 70:30 uchun 29.5% ni tashkil etdi. Bu xitozan va PVA molekulari o'rtasida kuchli molekulararo ta'sirlanish natijasida kristall tuzilish buzilganidan dalolat beradi. $2\theta = 7.18^\circ$ da PVA uchun xarakterli kichik pik nanotolalarda yo'qoldi, bu komponentlarning to'liq aralashganini tasdiqlaydi.

4.4. TGA tahlili natijalari

Termogravimetrik tahlil xitozan, PVA va ularning kompozit nanotolarining termik xususiyatlarini baholash uchun amalga oshirildi (4-rasm). Sof xitozan ikkita asosiy og'irlik yo'qotish bosqichini ko'rsatdi: 35-118°C da namlik bug'lanishi (~5%) va 182-400°C da termik degradatsiya (~49.7%). Sof PVA ham ikki bosqichli yo'qotish ko'rsatdi: 51-134°C da namlik (~4%) va 157-450°C da PVA degradatsiyasi (~90.5%).



4-RASM: Xitozan, PVA va xitozan-PVA nanotolarining TGA va DTG egri chiziqlari (25-500°C oralig'ida)

Xitozan-PVA nanotolarini uch bosqichli og'irlik yo'qotishini namoyon etdi: 50-158°C da namlik va erituvchi qoldiqlari, 250-330°C da PVA yon zanjirlarining parchalanishi, va 320-400°C da xitozan polimer zanjirlarining degradatsiyasi. DTG egri chiziqlari ikki asosiy pik ko'rsatdi: 250°C atrofida (PVA va qisman xitozan degradatsiyasi) va 317-345°C da (xitozan to'liq degradatsiyasi). Xitozan konsentratsiyasining oshishi bilan termik barqarorlik yaxshilandi: sof PVA uchun parchalanish 310°C dan, PVA/CS 80:20 uchun 340°C dan boshlandi.

4.5. Mikroblarga qarshi faollik

Xitozan-PVA nanotolarining antimikrob faolligi *Escherichia coli* (Gram-manfiy) va *Staphylococcus aureus* (Gram-musbat) bakteriyalariga qarshi disk diffuziya usuli bilan baholandi. Natijalar 2-jadvalda keltirilgan. Sof PVA nanotolarini antimikrob ta'sir ko'rsatmadi, inhibitsiya zonalarini kuzatilmadi. Xitozan qo'shilishi bilan antimikrob faollik sezilarli darajada oshdi.

2-jadval. Xitozan-PVA nanotolarining antimikrob faolligi (inhibitsiya zonasi diametri, mm)

Namuna	<i>E. coli</i>	<i>S. aureus</i>
PVA (100:0)	0	0
PVA/CS (90:10)	12.5±0.8	14.2±1.1
PVA/CS (80:20)	16.8±1.2	18.5±1.4
PVA/CS (70:30)	20.4±1.5	22.8±1.8
Gentamitsin (nazorat)	24.5±1.2	26.2±1.5

Xitozan konsentratsiyasi ortishi bilan antimikrob ta'sir kuchaydi. PVA/CS 70:30 namunasi eng yuqori faollik ko'rsatdi: *E. coli* ga qarshi 20.4±1.5 mm va *S. aureus* ga qarshi 22.8±1.8 mm inhibitsiya zonasi. Bu xitozanning kation tabiati bakteriya hujayra membranasiga ta'sir qilishi va membrana buzilishiga olib kelishi bilan izohlanadi. *S. aureus* ga nisbatan

yuqoriroq sezgirlik Gram-musbat bakteriyalarning peptidoglikan qavatining tashqi yuzasi xitozan bilan to'g'ridan-to'g'ri o'zaro ta'sirini ko'rsatadi.

5. Xulosa

Ushbu tadqiqot elektr yigirish texnologiyasi orqali xitozan-PVA gibrid nanotolalarini muvaffaqiyatli sintez qilish va ularning to'liq xarakterizatsiyasini ko'rsatdi. Quyidagi asosiy xulosalar olindi:

1. Optimal elektr yigirish parametrlari aniqlandi: PVA/CS 80:20 nisbati, 23 kV kuchlanish, 0.5 ml/soat oqim tezligi va 12 sm igna-kollektor oralig'i bir xil, munchoqsiz 145 ± 38 nm diametrli tolalar hosil bo'lishini ta'minladi. 2. FTIR spektroskopiya xitozan va PVA molekulari o'rtasida kuchli vodorod bog'larining mavjudligini tasdiqladi, bu ikki polimerning yaxshi uyg'unligini ko'rsatadi.

3. XRD tahlili nanotolalarning yarim kristall tabiati va kristallik darajasining xitozan qo'shilishi bilan kamayishini aniqladi, bu molekulararo ta'sirlanish natijasida kristall tuzilishning buzilishidan dalolat beradi.

4. TGA ma'lumotlari xitozan-PVA nanotolalarining termik barqarorligini tasdiqladi, parchalanish harorati xitozan konsentratsiyasi bilan 310°C dan 340°C gacha oshdi.

5. Antimikrob testlar *E. coli* va *S. aureus* bakteriyalariga qarshi yuqori faollik ko'rsatdi, PVA/CS 70:30 namunasi mos ravishda 20.4 mm va 22.8 mm inhibitsiya zonasi hosil qildi.

Olingan natijalar xitozan-PVA gibrid nanotolalarining tibbiy to'qimalar muhandisligi, jarohat parvarish materiallari, dori yetkazish tizimlari va antimikrob qoplamalar uchun istiqbolli material sifatida qo'llanilishi mumkinligini ko'rsatadi. Kelajakda in vivo tadqiqotlar, mexanik xususiyatlarni yaxshilash va boshqa bioaktiv moddalarni qo'shish bo'yicha ishlar amalga oshirilishi tavsifa etiladi.

Adabiyotlar:

1. Reneker D.H., Yarin A.L. (2008). Electrospinning jets and polymer nanofibers. *Polymer*, 49(10), 2387-2425.
2. Theron S.A., Zussman E., Yarin A.L. (2004). Experimental investigation of the governing parameters in the electrospinning of polymer solutions. *Polymer*, 45, 2017-2030.
3. Zhang Y., Huang X., Duan B., Wu L., Li S., Yuan X. (2007). Preparation of electrospun chitosan/poly(vinyl alcohol) membranes. *Colloid Polym Sci*, 285(8), 855-863.
4. Ohkawa K., Cha D., Kim H., Nishida A., Yamamoto H. (2004). Electrospinning of chitosan. *Macromol Rapid Commun*, 25, 1600-1605.
5. Jia Y.T., Gong J., Gu X.H., Kim H.Y., Dong J., Shen X.Y. (2007). Fabrication and characterization of poly(vinyl alcohol)/chitosan blend nanofibers produced by electrospinning method. *Carbohydr Polym*, 67, 403-409.
6. Liu Y., Kim H.I. (2014). Preparation and characterization of chitosan-based nanofibers by ecofriendly electrospinning. *Mater Lett*, 132, 23-26.
7. Duru Kamaci U., Peksel A. (2020). Fabrication of PVA-chitosan-based nanofibers for phytase immobilization to enhance enzymatic activity. *Int J Biol Macromol*, 164, 3315-3322.
8. Kaur H., Singh S., Rode S., et al. (2024). Fabrication and characterization of polyvinyl alcohol-chitosan composite nanofibers for carboxylesterase immobilization. *Sci Rep*, 14, 19615.
9. Yang, Zhang, Zhang. (2019). Electrospun Chitosan/Poly(Vinyl Alcohol)/graphene oxide nanofibrous membrane with ciprofloxacin antibiotic drug for potential wound dressing application. *Int J Mol Sci*, 20, 4395.

10. Mansur H.S., Sadahira C.M., Souza A.N., Mansur A.A.P. (2008). FTIR spectroscopy characterization of poly(vinyl alcohol) hydrogel with different hydrolysis degree. *Mater Sci Eng C*, 28, 539-548.
11. Abbaspour M., Sharif Makhmalzadeh B., Rezaee B., Shoja S., Ahangari Z. (2015). Evaluation of the antimicrobial effect of chitosan/polyvinyl alcohol electrospun nanofibers containing mafenide acetate. *Jundishapur J Microbiol*, 8(10), e24239.
12. Liu Y., Liu Y., Liao N., Cui F., Park M., Kim H.Y. (2015). Fabrication and durable antibacterial properties of electrospun chitosan nanofibers with silver nanoparticles. *Int J Biol Macromol*, 79, 638-643.
13. Abdelgawad A.M., Hudson S.M., Rojas O.J. (2014). Antimicrobial wound dressing nanofiber mats from multicomponent (chitosan/silver-NPs/polyvinyl alcohol) systems. *Carbohydr Polym*, 100, 166-178.
14. Kazeminava F., et al. (2022). Electrospun nanofibers based on carboxymethyl cellulose/polyvinyl alcohol as a potential antimicrobial wound dressing. *Int J Biol Macromol*, 214, 111-119.
15. Development and characterization of electrospun chitosan-chitin-PVA nanofiber (2025). *J Mater Sci: Mater Eng*. <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00318-4>
16. Thien, D. V. H. (2018). Electrospun chitosan/PVA nanofibers for drug delivery. *Vietnam Journal of Science and Technology*, 54, 185-?. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/54/4B/12040>
17. Gonçalves, R., Ferreira, W., Gouvêa, R., & Andrade, C. (2017). Effect of chitosan on the properties of electrospun fibers from mixed poly(vinyl alcohol)/chitosan solutions. *Materials Research*, 20, Article e20160618. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0618>
18. Olvera Bernal, R. A., Olekhnovich, R. O., & Uspenskaya, M. V. (2023). Chitosan/PVA Nanofibers as Potential Material for the Development of Soft Actuators. *Polymers*, 15(9), 2037. <https://doi.org/10.3390/polym15092037>
19. Choo, K., Ching, Y. C., Chuah, C. H., Julai, S., & Liou, N.-S. (2016). Preparation and Characterization of Polyvinyl Alcohol-Chitosan Composite Films Reinforced with Cellulose Nanofiber. *Materials*, 9(8), 644. <https://doi.org/10.3390/ma9080644>
20. Cerqueira, G., Gomes, D., Victor, R., Figueiredo, L., Medeiros, E., Neves, G., Menezes, R., & Silva, S. (2023). Development of PVA/chitosan nanofibers by a green route using solution blow spinning. *Journal of Polymers and the Environment*, 32, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03033-3>