مجله علوم و صنایع غذایی ایران

سایت مجله: www.fsct.modares.ac.ir

مقاله علمی_پژوهشی

کامپوزیت پلی مرهای زیست تخریب‌پذیر و نانو ذرات در هیدروژل‌ها: بررسی و عملکرد آنها

امین ابوالقاسمی ماهانی

استادیار گروه مهندسی شیمی دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنرکرمان، کرمان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶

کلمات کلیدی:

کامپوزیت پلیمری،

زیست تخریب‌پذیر،

نانو ذرات،

هیدروژل.

DOI:10.22034/FSCT.21.149.140.

* مسئول مکاتبات:

a.m.abolghasemi@uk.ac.ir

چکیده

این مطالعه با هدف بررسی کامپوزیت پلی مرهای زیست تخریب‌پذیر و نانوذرات در هیدروژل‌ها در قالب یک مقاله مروری انجام شد. کامپوزیت‌های پلیمری زیست تخریب‌پذیر با نانو ذرات در هیدروژل‌ها، یک زمینه پژوهشی پیشرفته است که تجمع فناوری‌های نوین در زمینه پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر و نانومواد را به یکدیگر می‌آمیزد. این کامپوزیت‌ها با ادغام پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر، که به طور طبیعی تجزیه می‌شوند و اثرات مخرب بر محیط زیست را کاهش می‌دهند، با نانو ذرات در هیدروژل‌ها ایجاد می‌شوند. حضور نانوذرات در ساختار این کامپوزیت‌ها، خواص مکانیکی، الکتریکی، و حرارتی را بهبود بخشیده و این ترکیبات را به عنوان مواد چندکاره با کاربردهای گسترده در زمینه‌های صنایع غذایی، بسته بندی، پزشکی، محیط زیست و الکترونیک ساخته است. هیدروژل به‌عنوان ماتریس اصلی این کامپوزیت‌ها، توانایی جاذب‌های آب و انتقال کنترل‌شده مواد فعال را تضمین می‌کند. این پیشرفت‌ها نه‌تنها در زمینه علمی و مهندسی بلکه در ساخت راهکارهای مستدام برای فناوری‌های آینده نیز اهمیت دارد.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

۱-مقدمه

هیدروژل‌ها نوعی از مواد پلیمری هستند که با ساختار شبکه‌ای آن‌ها متشکل از پیوندهای متقاطع فیزیکی یا شیمیایی مشخص می‌شوند که به آن‌ها قابلیت‌های استثنایی برای تورم و جذب آب می‌بخشد [۱] ویژگی منحصر به فرد هیدروژل‌ها که آن‌ها را از دیگر پلیمرها متمایز می‌کند توانایی آن‌ها در تحمل پیوندهای متقابل فیزیکی است که می‌تواند از درهم‌سازی زنجیره، تشکیل کریستال درون ساختار پلیمر، یا برهمکنش‌های ضعیف مانند پیوند هیدروژنی یا نیروهای واندروالسی ناشی شود. این پیوندهای متقاطع را می‌توان به عنوان یک زیر شاخص از اوراق قرضه مذکور در نظر گرفت [۲]

هیدروژل‌ها که به عنوان ژل‌های آبدوست نیز شناخته می‌شوند، اساساً شبکه‌های پلیمری هستند که از طریق ترکیب آب به طور قابل توجهی گسترش یافته‌اند. این شبکه‌های زنجیره‌های پلیمری که اغلب به عنوان ژل‌های کلوئیدی روبرو می‌شوند، پراکندگی آب را در ساختار خود نشان می‌دهند و آن‌ها را بسیار آبدوست می‌کند [۳].

کامپوزیت پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر یک نوع مواد پلیمری است که از ترکیبات طبیعی مانند ساکاروز، نشاسته، یا گلوکز تولید می‌شود و هنگام دفن، کمپوست‌سازی یا تجزیه طبیعی توسط میکروب‌ها و انزیم‌ها تخریب می‌شود. این نوع پلیمرها معمولاً از منابع تجدیدپذیر مانند گیاهان و میکروب‌ها تولید می‌شوند و به عنوان جایگزینی برای پلیمرهای نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرند [٤, ٥]. استفاده از کامپوزیت پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر به منظور کاهش آلودگی محیط زیست و کاهش وابستگی به منابع غیرتجدیدپذیر، از جمله اهداف اصلی صنایع پلاستیکی است. این نوع پلیمرها می‌توانند در بسته‌بندی، لوازم آرایشی و بهداشتی، لوازم خانگی، لوازم الکترونیکی و دیگر محصولات مصرفی استفاده شوند [٤].

نانوذرات در علم مواد و مهندسی مواد به ذراتی با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر یا ۰.۱ میکرومتر اطلاق می‌شود. این ذرات به دلیل ابعاد کوچک خود و خواص منحصر به فردی که دارند، قابلیت اثرگذاری بسیار بالا در مقیاس نانو را دارند. در صنایع غذایی، نانوذرات به عنوان یک فناوری نوظهور واکنش‌پذیر و کارآمد برای بهبود ویژگی‌های مواد غذایی و همچنین بهبود روش‌های بسته‌بندی و حفظ ایمنی غذا مورد استفاده قرار می‌گیرد [٦]. استفاده از نانوذرات در صنایع غذایی به‌عنوان یک جنبه پیشرفته و نوآورانه، جدیدترین تحولات را در تولید، بسته‌بندی، و حتی مصرف مواد غذایی فراهم کرده است. این نانوذرات به دلیل ابعاد نانومتری خود، توانایی برتری در افزایش مساحت سطح و ارتباط مؤثر با مواد غذایی را دارند [۷]. در بسته‌بندی مواد غذایی، نانوذرات می‌توانند به عنوان عامل‌های حاصل از نانوتکنولوژی برای افزایش مقاومت به اکسیژن و رطوبت، بهبود نگهداری و افزایش عمر مفید محصولات غذایی عمل کنند. همچنین، در تولید مواد غذایی، نانوذرات به عنوان کاتالیزورها، عامل‌های آرایشی و طعم‌دهنده‌ها به‌کار می‌روند، که این امور به بهبود خصوصیات سنتز و کیفیت نهایی محصولات غذایی کمک می‌کند [۸-۱۱]. با این وجود، نیاز به توجه به جنبه‌های ایمنی و اثرات سلامتی نانوذرات در صنایع غذایی نیز امری حیاتی است که نیازمند تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌باشد.

۲- هیدروژل

هیدروژل‌ها پلیمرهای انعطاف‌پذیری هستند که می‌توانند به نسبت حجم اصلی خود چندین برابر بیشتر شوند و با استفاده از حلال‌ها، محرک‌های فیزیکی یا شیمیایی فعال شوند [۱۲]. آن‌ها بر اساس منابع، روش‌های تشکیل و واکنش‌پذیری دسته‌بندی می‌شوند. هیدروژل‌ها به دلیل توانایی جذب مقادیر زیادی از آب یا سوی‌های زیستی، در برنامه‌های پزشکی توجه زیادی جلب کرده‌اند. آن‌ها به عنوان محافظان دارو، حامل‌های قابل هدف‌گیری برای داروهای زیست‌فعال و به عنوان یک سیستم تحویل برای مولکول‌های زیست‌فعال

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

استفاده می‌شوند. هیدروژل‌ها با اتصال متقابل پلیمرهای حل در آب تهیه می‌شوند و می‌توانند به واکنش نسبت به محرک‌های خارجی مانند pH، دما و غلظت نمک تورم کنند [۱۳]. آن‌ها دارای محتوای آب بالا، ساختار نرم و لاستیکی در صنایع غذایی کاربرد دارند. هیدروژل‌ها ویژگی‌های قابل تنظیمی نظیر پراکندگی، مقاومت کششی و ظرفیت بارگذاری دارو دارند که آن‌ها را برای طراحی هیدروژل‌های سازگار با زیست‌محیطی مناسب می‌کند [۱٤].

۲-۱- مکانیسم تشکیل هیدروژل

ترکیبات پلیمری مورد استفاده در ساخت هیدروژل‌ها معمولاً از دسته کربوهیدرات، مانند چربی‌ها، پلی‌اکریلات‌ها، پلی‌اکریلامیدها، پلی‌اتیلن گلیکول، ژلاتین و غیره تشکیل شده‌اند. این ترکیبات پلیمری به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی خود، از جمله قابلیت جذب آب بالا، انعطاف‌پذیری، سازگاری زیستی و وجود گروه‌های عاملی مختلف، برای ساخت هیدروژل‌ها مناسب هستند [۱۵].

۱-۱-۲- اتصال عرضی شیمیایی

استفاده از اتصالات عرضی از نوع شیمیایی در تشکیل یا تولید هیدروژل، می‌توان هیدروژل‌هایی با قابلیت تبدیل از حالت مایع به جامد از طریق پیوند کووالانسی و همچنین استحکام مکانیکی بالا تولید کرد. همچنین محققین در تولید چنین هیدروژل‌هایی از پلیمریزاسیون نوری، واکنش‌های آنزیمی و واکنش‌های کلیک [۱٦]. این نوع اتصال به شیوه مختلفی صورت می‌گیرد شامل:

۱- پلیمریزاسیون نوری:

در پلیمریزاسیون نوری، پلیمرهای حساس به نور با استفاده از اشعه ماورای بنفش یا لیزر، به شکل هیدروژل تبدیل می‌شوند. در این روش، نور به عنوان عامل پلیمریزاسیون استفاده می‌شود و از حلال‌ها برای انجام واکنش استفاده نمی‌شود. به علاوه، این روش با مصرف انرژی پایینی همراه است. در پلیمریزاسیون نوری، پلیمرهای دارای گروه‌های آکریلات و متاکریلات به شکل هیدروژل تبدیل می‌شوند. اتصال عرضی در این روش بر روی پلیمرها باعث تجزیه گروه‌های آکریلات و متاکریلات می‌شود که باعث تشکیل رادیکال‌های آزاد می‌شود. این رادیکال‌ها با پلیمرهای دیگر و با یکدیگر واکنش می‌کنند و باعث تشکیل هیدروژل می‌شوند [۱۷].

۲- واکنش‌های آنزیمی

واکنش‌های آنزیمی در تولید هیدروژل، با استفاده از آنزیم‌ها به عنوان کاتالیست برای واکنش‌های شیمیایی انجام می‌شود. در این روش، حضور آنزیم در محیط بیولوژیک، امکان انجام واکنش به صورت طبیعی و با کارایی بالا را فراهم می‌کند [۱۸]. برای اتصال عرضی با استفاده از واکنش‌های آنزیمی، نیازمند کنترل عوامل دمایی، قدرت یون هیدروژن در محیط و سایر شرایط محیط بیولوژیکی هستیم. به دلیل وجود زیرلایه مخصوص آنزیم، از ورود ترکیبات سمی که به وسیله واکنش‌های جانبی ایجاد می‌شوند، جلوگیری می‌شود [۱۹].

۳- واکنش‌های کلیک

واکنش‌های کلیک یک روش کارآمد برای اتصال عرضی مولکول‌ها و ساختارهای پلیمری است. این واکنش‌ها در حضور کاتالیزور انجام می‌شوند و از مزایایی مانند تسریع در انجام واکنش و بازدهی بالا، ویژگی‌های زیست‌سازگاری و شرایط مطلوب واکنش برخوردارند. این روش به عنوان یک روش مؤثر برای عامل دار کردن مولکول‌ها، بستری برای اتصالات عرضی شیمیایی هیدروژل‌ها بر پایه پلی‌ساکاریدها و سنتز پلیمر و فعال‌سازی‌شان و همچنین ساخت هیدروژل‌ها، نانوژل‌ها و میکروژل‌ها در مهندسی پزشکی و رهایش دارو شناخته شده است [۲۰]. واکنش‌های مس کاتالیزور شده با آلکین آزید سیکواستر، واکنش‌های کاتالیزی جفت آزاد آلکین آزید، واکنش سیلکواستر با دیس آلدر و واکنش بین گروه‌های آلکین و آزید از جمله واکنش‌های کلیک محسوب می‌شوند. این واکنش‌ها به دلیل بازدهی بالا در شرایط فیزیولوژیکی بدن و حالت انتخابی، به عنوان روش‌های مؤثری برای اتصال عرضی مولکول‌ها شناخته می‌شوند [۲۱].

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

۲-۱-۲- اتصال عرضی فیزیکی

در سنتز هیدروژل با این روش می‌توان به تغییر در نیروهای درون مولکولی اشاره کرد که با برقراری پیوند هیدروژنی، برهم کنش آب گریزی و نیروی یونی الکترواستاتیکی از قبیل روش‌های پونی، روش‌های وابسته به دما و روش‌های وابسته به pH برای اتصال عرضی انجام می‌شود [۲۲]. این نوع اتصال نیز به شیوه‌های مختلفی انجام می‌شود که شامل:

۱- اتصال عرضی یونی

اتصال عرضی یونی یک روش فیزیکی برای اتصال عرضی مولکول‌ها است که بدون ایجاد پیوند کووالانسی بین زنجیره‌های پلیمرها انجام می‌شود. این روش برای تشکیل ژل و دست‌یابی به چقرمگی بیشتر در هیدروژل‌ها استفاده می‌شود [۲۳, ۲٤].

یکی از مثال‌های بارز این روش، تشکیل ژل با استفاده از آلژینات است. آلژینات یک پلی‌ساکارید طبیعی است که در حضور کاتیون‌های دو ظرفیتی مانند کلسیم، توانایی تشکیل ژل را دارد. در این روش، یون‌های کاتیونی منجر به پیوند گروه‌های گلورونیک اسید در زنجیره‌ی آلژینات و تشکیل پیوندهای یونی در داخل زنجیره پلیمری می‌شوند. هیدروژل‌های آلژینات به عنوان ECM (ماتریس خارج سلولی) کاربرد دارند و با بهینه‌سازی زمان ژلی شدن، خواص مکانیکی و برهم‌کنش‌های زیستی آن‌ها، می‌توان از آن‌ها در بیومواد قابل تزریق و کشت در شرایط آزمایشگاهی استفاده کرد [۲۳]. کیتوزان نیز از دیگر پلیمرهای طبیعی است که توانایی برقراری اتصال عرضی به روش یونی را دارد و در کاربردهایی نظیر رهایش دارو مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۵].

۲- روش‌های وابسته به دما

روش‌های وابسته به دما یکی از روش‌های مهم در تشکیل هیدروژل‌ها با اتصال عرضی فیزیکی است. هیدروژل‌های حساس به دما در دمای پایین به صورت مایع و در دمای بدن به صورت ژل تغییر شکل می‌دهند. این ویژگی می‌تواند در کاربردهای پزشکی و مهندسی بافت مفید باشد. بعضی از هیدروژل‌ها از پلیمرهای محلول در آب به دست می‌آیند و دارای خاصیت ژلی شدن تحت تغییرات دمایی بدون نیاز به تحریک شیمیایی هستند. این نوع هیدروژل‌ها می‌توانند دمای ژلی شدن آن‌ها را به دمای نزدیک به دمای طبیعی بدن تنظیم کنند، بنابراین می‌توانند به صورت مایع در بدن تزریق شده و در نهایت به شکل جامد تبدیل شوند.

۲-۲- انواع هیدروژل‌ها

بله، هیدروژل‌ها بر اساس نوع پلیمر مورد استفاده، به هیدروژل‌های طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. هیدروژل‌های تشکیل شده توسط پلیمرهای طبیعی یا مصنوعی به عنوان مواد اولیه برای کاربردهای پزشکی در نظر گرفته می‌شوند. این پلیمرها باید تجزیه‌پذیر باشند و در برخی کاربردها که هیدروژل در تماس با خون است، باید با خون سازگار باشند [۲٦].

از نظر روش آماده‌سازی، هیدروژل‌ها به سه دسته هموپلیمرها، کوپلیمرها و هیدروژل‌های چندپلیمری فشرده تقسیم می‌شوند.

۱. هموپلیمرها: این هیدروژل‌ها دارای شبکه پلیمری هستند که از واحدهای مونومری یکسان به وجود آمده و واحدهای ساختاری پایه‌ای و ابتدایی شبکه پلیمری را تشکیل می‌دهند.

۲. کوپلیمرها: این هیدروژل‌ها شامل دو یا بیشتر از دو مونومر مختلف با حداقل یک جزء هیدروفیل هستند که به طور تصادفی یا تناوبی در طول زنجیره پلیمری آرایش یافته‌اند.

۳. هیدروژل‌های چندپلیمری فشرده: این گروه از هیدروژل‌ها از به هم پیوستن دو یا چند پلیمر مستقل طبیعی یا سنتتیک که درون شبکه پلیمری احاطه شده‌اند و با یکدیگر اتصالات عرضی تشکیل داده‌اند، به وجود می‌آیند [۲۷].

این طبقه‌بندی‌ها می‌تواند در طراحی و استفاده از هیدروژل‌ها برای کاربردهای مختلف، از جمله کاربردهای پزشکی، مفید باشد. هیدروژل‌ها بر اساس موارد مختلفی مانند نوع اتصالات

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

عرضی، بار الکتریکی زنجیره‌های اتصال یافته در شبکه و منشأ مواد پلیمری، می‌توانند دسته‌بندی شوند. این دسته‌بندی‌ها می‌توانند در درک و استفاده از هیدروژل‌ها برای کاربردهای مختلف، از جمله کاربردهای پزشکی و صنعتی، مفید باشند. در مورد دسته‌بندی بر اساس نوع اتصالات عرضی، هیدروژل‌ها به دو دسته فیزیکی و شیمیایی تقسیم می‌شوند. اتصالات عرضی شیمیایی اتصالات دائمی هستند، در حالی که پیوندهای فیزیکی ناپایدارند و ناشی از محصور شدن زنجیره پلیمری و یا واکنش‌هایی مانند برهمکنش‌های یونی، باندهای هیدروژنی و برهمکنش‌های هیدروفوب است.

در مورد دسته‌بندی بر اساس بار الکتریکی زنجیره‌های اتصال یافته در شبکه، هیدروژل‌ها به ٤ گروه تقسیم می‌شوند: بدون بار و خنثی، یونی (شامل آنیون‌ها و کاتیون‌ها)، الکترولیت آمفوتر (شامل هر دو گروه اسیدی و بازی) و یون دوقطبی که شامل هر دو گروه آنیونی و کاتیونی است که به صورت واحدهای تکراری درون ساختار جای گرفته‌اند [۲۸].

در مورد دسته‌بندی بر اساس منشأ مواد پلیمری، هیدروژل‌ها به دو دسته هیدروژل‌های مصنوعی و طبیعی تقسیم می‌شوند. هیدروژل‌های طبیعی خود به دو گروه هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی و هیدروژل‌های پپتیدی تقسی می‌شوند. هیدروژل‌های پلی‌ساکاریدی از پلی‌ساکاریدهای طبیعی مانند کلاژن، ژلاتین، کیتوزان و سلولز تشکیل شده‌اند، در حالی که هیدروژل‌های پپتیدی از پپتیدهای طبیعی مانند البومین و گلوبولین ساخته می‌شوند [۲۹].

در نهایت، دسته‌بندی هیدروژل‌ها بر اساس منشأ مواد پلیمری و نوع اتصالات عرضی می‌تواند به محققان و صنایع مختلف کمک کند تا بهترین نوع هیدروژل برای کاربردهای خاص خود را انتخاب کنند و از ویژگی‌های مطلوب آن استفاده کنند [۲۹].

۳-۲- هیدروژل‌های طبیعی

هیدروژل‌های طبیعی از پلیمرهایی که از منابع طبیعی مانند پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها به دست می‌آیند، تشکیل شده‌اند. استفاده از این نوع پلیمرها برای تشکیل هیدروژل‌ها مزایای بسیاری دارد، از جمله زیست سازگاری، زیست تخریب‌پذیری و عدم سمی بودن. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که هیدروژل‌های طبیعی برای کاربردهای پزشکی و دارویی بسیار مناسب باشند [۳۰].

استفاده از پلیمرهای طبیعی برای ساخت هیدروژل‌ها به هدف استفاده از بیومواد و مواد زیستی بستگی دارد. به عنوان مثال، هیدروژل‌های مورد استفاده برای رهاسازی کنترل شده مواد باید زیست سازگار، زیست تخریب‌پذیر و غیر سمی باشند. پلیمرهای طبیعی که حاوی پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها هستند، به طور گسترده به عنوان حامل برای آزادسازی مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۱].

۱-۳-۲- دانه‌های پلیمری

دانه آلژینات

آلژینات واکنش‌پذیری با یون‌های دو ظرفیتی مانند Fe^{+3} را توصیف می‌کند که منجر به ایجاد دانه‌های هیدروژل با ساختار شبکه سه بعدی می‌شود. این خصوصیت می‌تواند منجر به بارگذاری بیشتر دارو در دانه‌های هیدروژل شود و انتشار مداوم دارو را در مایع روده شبیه‌سازی شده فراهم کند. علاوه بر این، تعامل بین کاتیون‌های آلژینات و یون‌های چند ظرفیتی می‌تواند منجر به تشکیل هیدروژل‌های سفت شود. این اطلاعات نشان می‌دهند که آلژینات به عنوان یک پلیمر طبیعی می‌تواند برای ایجاد هیدروژل‌های مورد استفاده در زمینه‌های داروسازی و تحریک‌پذیری داروها مورد استفاده قرار گیرد [۳۲].

اتصال سریعتر یون‌های Fe^{+3} با دانه‌های هیدروژل می‌تواند بهبود مواد دارویی بارگذاری شده در دانه‌های هیدروژل را فراهم کند. این امر به دلیل پیوند متقاطع دانه‌های هیدروژل با یون‌های Fe^{+3} و تشکیل ساختار شبکه سه بعدی است که باعث انتشار مداوم دارو در مایع روده شبیه‌سازی شده

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

می‌شود. همچنین، تعامل بین کاتیون‌های آلژینات و یون‌های چند ظرفیتی منجر به تشکیل هیدروژل‌های سفت می‌شود که می‌تواند منبعی مؤثر برای بارگذاری و انتشار داروها باشد. این اطلاعات مبتنی بر مقاله‌ای از Swamy & Yun در سال ۲۰۱۵ است و نشان می‌دهد که این خصوصیات می‌تواند مزیت‌های قابل توجهی برای کاربردهای داروسازی داشته باشد (Figure 1) [۳۳].

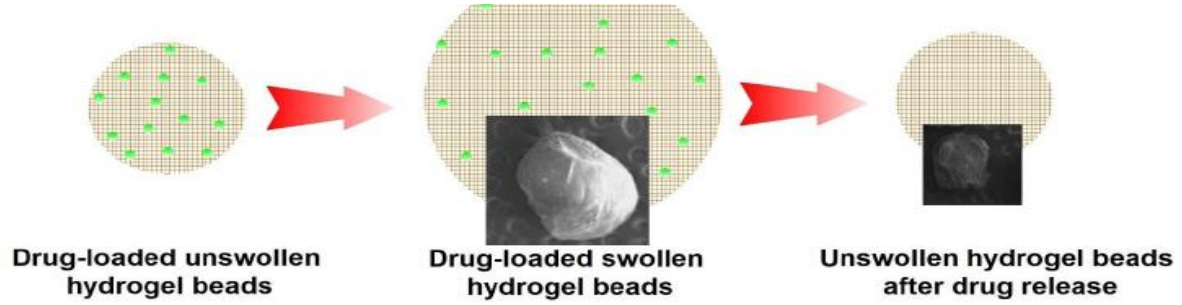

Figure 1- Schematic representation of swollen and non-swollen hydrogels before and after the release of the drug. Inset: SEM micrographs of metformin-loaded hydrogel beads before and after drug release in hydrogel beads[34]

.

۲-۳-۲- دانه‌های کیتوزان

کیتوزان به عنوان یک پلیمر زیست‌پایدار و غیرسمی، با توانایی تشکیل دانه‌های ژل با مورفولوژی کروی، برای استفاده در فناوری‌های تحویل دارو مناسب است [۳۵]. همچنین، ترکیبات معدنی نانومقیاس مانند نانوذرات معدنی و نانوذرات فلزی می‌توانند از آغاز کنترل نشده انتشار داروها جلوگیری کنند و بهبودهای فناورانه مختلفی را برای هیدروژل‌ها فراهم کنند [۳۶].

این فناوری‌ها و مواد می‌توانند به عنوان حامل‌های دارویی هوشمند برای استفاده در تحویل داروها بهبود یابند. همچنین، ترکیبات معدنی نانومقیاس می‌توانند بهبودهای موجود در هیدروژل‌ها را تقویت کرده و کنترل بهتری بر روی انتشار داروها فراهم کنند [۳۷]. در نهایت، عکس‌های دیجیتالی کیتوزان بر پایه دانه‌های هیدروژل و نانوکامپوزیت‌های CH/CuO/hydrogel که ارائه شده است، نشان می‌دهد که این ترکیبات می‌توانند به عنوان یک پلتفرم مناسب برای تحویل داروها بهبود یابند و از انتشار ناکنترل شده داروها جلوگیری کنند (Figure 2).

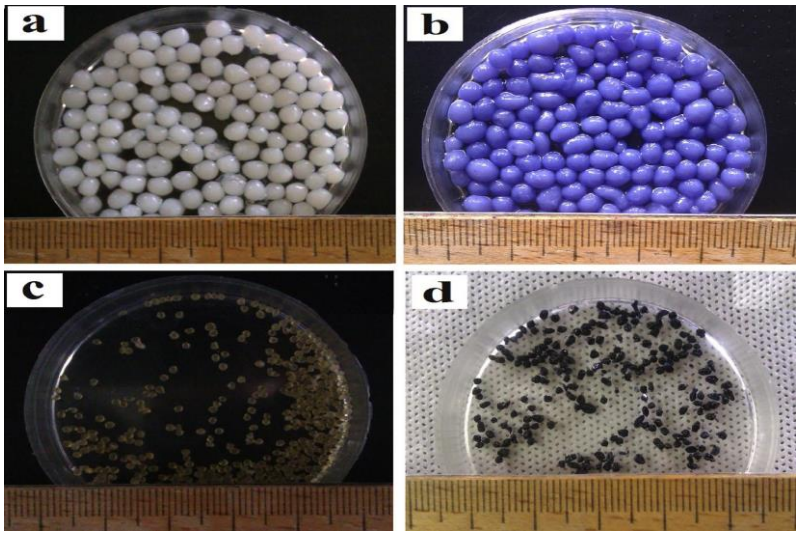

Figure 2- Digital photo of pure chitosan hydrogel seed in wet (a) and dry (c) state, CH/CuO nanocomposite hydrogel seed in wet state (b) and dry state (d). [۳۸]

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

در تحقیقات مشابه و در بسیاری از جنبه‌ها، مشخصات دقیق انتشار دارو از جمله هیدروژل حاوی رس، هیدروکسی آپاتیت، CuO، MgO و غیره مورد بررسی قرار می‌گیرد [۳۹, ٤٠].

در همین راستا، بر اساس پیوند عرضی-هیدروژل نانوکامپوزیت‌ها نقش مهمی در پروفایل‌های تعامل ایفا می‌کنند [٤١-٤٤]. فعل و انفعالات بین نانورس (NC) و هیدروژل به صورت تئوری یا تجربی به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۳). با داشتن ویژگی‌هایی از قبیل قابلیت پردازش، شکل یکنواخت و اندازه کوچک [٤٥, ٤٦]، دانه‌های ژل می‌توانند بلافاصله در دستگاه گوارش تجزیه شوند، که می‌تواند منجر به انتشار دارو با محتوای بالا شود [٤٧].

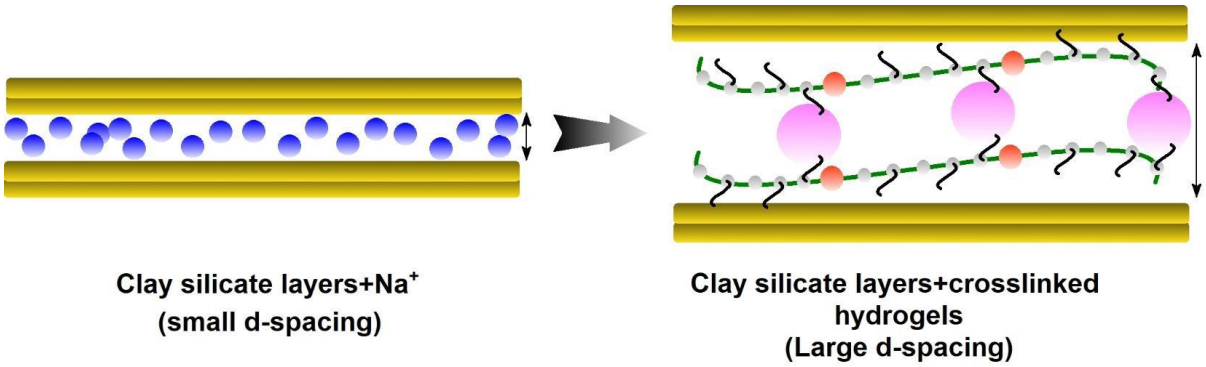

Figure 3- Hypothetical model of the possible combination between hydrogel and nanoclay after forming the nanocomposite.[٤٧]

۳-۳-۲- دانه‌های هتروپلیمر

هتروپلیمرها را می‌توان بر اساس ترکیبات پلیمری طبقه‌بندی کرد. این طبقه‌بندی‌ها در زیر ذکر شده است:

۱- هموپلیمر: ساختار اساسی هر پلیمر، از جمله شبکه‌ای از مونومرهای منفرد است و می‌تواند به منظور ایجاد ساختار پلیمری، دارای پیوند عرضی باشد. در تشکیل ساختار، ماهیت مونومر و روش پلیمریزاسیون انتخابی نقش‌های مهمی ایفا می‌کنند [٤٨].

۲- کوپلیمر - حداقل از دو مونومر مختلف و یک محفظه آب دوست تشکیل شده است. در این پلیمر، اسکلت پلیمری را می‌توان به صورت تصادفی یا بصورت بلوکی مرتب کرد. علاوه بر این، می‌توان آن را به صورت متناوب در طول زنجیره پلیمر پیکربندی کرد [٤٩].

۳- شبکه پلیمری متقابل (IPN): شامل دو پلیمر متصل به هم (طبیعی، مصنوعی) دو نوع شبکه پلیمری متقابل وجود دارد. شبکه پلیمری متقابل معمولی (دو پلیمر متصل به هم) و نیمه شبکه پلیمری متقابل (یک پیوند متقاطع و یک پلیمر بدون پیوند) [٥٠].

٤-۳-۲- دانه‌های پلیمری: استراتژی‌ها و روش‌های آماده‌سازی

همانطور که قبلاً نیز گفته شد، هیدروژل‌ها از مواد طبیعی و مصنوعی در یک شبکه سه بعدی از زنجیره‌های پلیمری با ظرفیت جذب آب/سیال بالا ساخته می‌شوند [٥١].

گروه‌های عملکردی آب دوست مانند هیدروکسیل (-OH)، آمید اولیه و ثانویه (-CO-NH-) و سولفونیل هیدروکسید (-SO2OH) می‌توانند آب دوستی بیشتری در هیدروژل‌ها ایجاد کنند، در حالی که پیوند عرضی فیزیکی بر یکپارچگی فیزیکی تأثیر می‌گذارد. پیوند عرضی فیزیکی از طریق؛ الف) فعل و انفعالات آبگریز، هیدروژن، یونی، حوزه فیزیکی در حالی که پیوند عرضی شیمیایی با پیوند کووالانسی در حضور عامل پیوند عرضی و دیوینیل بنزن به عنوان مثال اتیلن گلیکول، کنترل می‌شود [٥٢].

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

پیوند عرضی فیزیکی نقش مهمی در تشکیل شبکه هیدروژل ایفا می‌کند. این به عنوان ژل‌های برگشت‌پذیر (فیزیکی) شناخته می‌شود، زیرا نیروی ثانویه یا گرفتاری‌های مولکولی موثر هستند. ژل‌های فیزیکی را می‌توان در محیط اطراف خود حل کرد. میزان انحلال را می‌توان با تغییر pH و یا دما تغییر داد. در هر دو محیط خشک و مرطوب، ژل‌های شیمیایی را می‌توان با پیوند کووالانسی ماکرومولکول‌ها با پلیمرهای متقاطع پلیمریزاسیون کرد. دو نوع ژل شیمیایی وجود دارد. شارژ شده یا بدون شارژ می‌باشندکه این بستگی به ماهیت گروه‌های عملکردی ساختاری دارد. در هیدروژل‌های باردار، تغییر pH می‌تواند بر تورم تأثیر بگذارد، در نتیجه می‌تواند در زمینه‌های الکتریکی تغییر شکل دهد [۵۳].

هیدروژل‌های شیمیایی اغلب به دو روش ساخته می‌شوند. پلیمریزاسیون سه بعدی و اتصال مستقیم. در پلیمریزاسیون سه بعدی، دو محفظه اصلی وجود دارد. یک مونومر آب دوست و عامل اتصال عرضی، در حالی که در روش پلیمرهای آب دوست مستقیم وجود دارد [٥٤]. به طور کلی، پلیمریزاسیون سه بعدی پس از پلیمریزاسیون از مونومرهای دست نخورده تحت تأثیر قرار گرفته، بنابراین، برای از بین بردن مونومرهای سمی از توده، کنترل زمان لازم است [۵۵].

۵-۳-۲- کاربردهای دانه‌های پلیمری بر پایه نانوکامپوزیت

۱- ضد میکروبی

اخیراً، هیدروژل‌های ضد باکتریایی در سال‌های اخیر به دلیل افزایش آن‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. پتانسیل زیست پزشکی در هیدروژل‌های ضد باکتری، نانوکامپوزیت‌های معدنی/آلی (هیدروژل) از نظر "پردازش" و "غیرفعال‌سازی باکتریایی" مطلوب‌تر هستند. وجود عوامل ضد باکتریایی در هیدروژل از رشد میکروبی جلوگیری می‌کند. هیدروژل‌های ضد میکروبی را می‌توان به سرعت در حضور مواد فعال و معدنی فعال کرد، بنابراین برای کاربردهای زیست پزشکی هوشمند مناسب است کیتوزان به خودی خود در pH = 7.0 هیچ گونه فعالیت ضد باکتریایی نشان نمی‌دهد. برای انتقال این ویژگی، ترکیب خارجی عوامل ضد باکتری پیشنهاد می‌شود [٥٦]

ترکیب فلزات نانومقیاس (نانوذرات طلا و نانوذرات نقره) و اکسیدهای فلز (مانند اکسید روی) در کیتوزان از نظر فعالیت ضدباکتریایی آن‌ها به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [٥٧]. در همین راستا، نانوذرات اکسید مس[1] ارزان قیمت با موفقیت به عنوان یک ماده ضدباکتریایی مؤثر در هیدروژل‌ها، که پایدار، ایمن، مقاوم (از نظر فیزیکی یا شیمیایی) و در برابر پلیمرها واکنش‌پذیر هستند، با موفقیت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در نانوکامپوزیت‌های کیتوزان/اکسیدمس و نانوذرات اکسید مس می‌توانند باکتری‌ها را متصل کرده و به دیواره سلولی آسیب برسانند. این می‌تواند در نهایت باعث مرگ سلولی شود [۵۸].

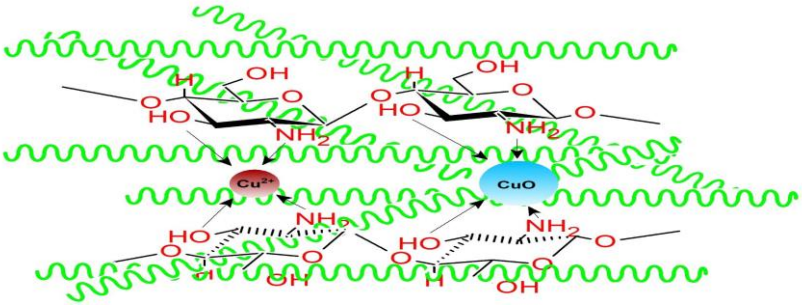

Figure 4. How chitosan interacts with copper and copper oxide nanoparticles.[۳۸]

1- Copper Oxide Nanoparticles (CuONPs)

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

۶-۳-۲- هیدروژل‌های مبتنی بر نانوکامپوزیت برای انتقال دارو

مواد نانومقیاس چندرشته‌ای شامل مواد لایه‌ای، نانولوله‌ها، اکسیدهای فلز و مواد پیچیده آلی- معدنی در ساخت دانه‌های جدید هیدروژل مبتنی بر نانوکامپوزیت مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۵۹-۶۱]. همانطور که قبلاً نیز گفته شد، هیدروژل‌ها به دلیل خواص فیزیکوشیمیایی منحصر به فرد خود، برای انتقال دارو بالقوه هستند [۶۲]. میزان نفوذپذیری هیدروژل‌ها بر اساس میزان پیوند عرضی و آب دوستی کنترل می‌شود. تخلخل‌های سطحی و فله نقش بیشتری در بارگیری/رهاسازی داروها ایفا می‌کنند [۴۷].

۲- دانه‌های حساس

واژه "هوشمند[۲]" اخیراً برای هیدروژل‌ها استفاده می‌شود، به ویژه با حساسیت نسبت به محیط. انگیزه‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی برای اصلاح انتخاب‌پذیری و حساسیت هیدروژل انتخابی بکارگیری می‌شود. هیدروژل‌های هوشمند به طور گسترده‌ای در مهندسی بافت‌های مصنوعی، جداسازی بیولوژیکی، سلول‌ها و واکنش‌های آنزیمی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بیشترین استفاده از هیدروژل‌ها احتمالاً هیدروژل‌های حساس به دما به عنوان طبقه‌ای از سیستم‌های پلیمری حساس به محیط زیست در تحقیقات تحویل دارو است، اما امروزه توانایی هیدروژل‌های حساس به آهنربایی استفاده آن‌ها را افزایش داده است [۶۳].

۳- دانه‌های مغناطیسی

همانطور که بیان شد، هیدروژل‌ها به عنوان پلیمرهای سه بعدی با طبیعت آب دوست شناخته می‌شوند که دارای قابلیت جذب و دفع مداوم آب هستند که می‌تواند حجم عظیمی از مایع را در حالت متورم نگه دارد [۶۴].

۴- دانه‌های فلورسنت

نقاط کوانتومی نیمه هادی (QDs) (II -VI)، سالهاست که به دلیل عملکرد چشمگیر فلورسانس در کاربردهای پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶۵] با این وجود، نیاز فوری به یک نانومواد پیشرونده است که می‌تواند جایگزین این نقاط کوانتومی نیمه هادی شود [۶۶]. علاوه بر این، نقاط کربنی (CD)، نانوکربن بی نظیر با ابعاد کمتر از ۱۰ نانومتر، در برنامه‌های زیستی چندرشته‌ای گزارش شده است [۶۷].

۴-۲- خصوصیات هیدروژل‌ها

هیدروژ لها پلیمرهایی هستند که قابلیت جذب و نگهداری آب را درون خود دارند و این خاصیت آن‌ها، سبب تورم هیدروژل می‌شود [۶۸].

۱-۴-۲- تورم

هیدروژل‌ها می‌توانند در محیط زیستی متورم شوند و مقدار زیادی آب را در خود نگه دارند. اتصال متقاطع بین زنجیره‌های ساختاری از انحلال جلوگیری می‌کند و ابعاد شبکه را حفظ می‌کند. خواص تورم هیدروژل به شدت به عوامل خارجی مانند دما، pH، غلظت یون و غیره بستگی دارد که به نوبه خود می‌تواند به فروپاشی یا انتقال فاز هیدروژل کمک کند. آزادسازی دارو عمدتاً با تورم یک هیدروژل است و انتشار دارو را می‌توان با تورم، آزادسازی یا هر دو کنترل کرد [۶۹].

۲-۴-۲- خواص مکانیکی

خواص مکانیکی هیدروژل‌ها به عنوان یکی از پارامترهای مهم برای طراحی مهندسی هیدروژل برای کاربردهای پزشکی در نظر گرفته می‌شود. در مهندسی بافت، خواص مکانیکی داربست‌ها در مقیاس ماکروسکوپی و میکروسکوپی نقش مهمی در تنظیم رفتار سلول ایفا می‌کند. سیگنال‌های بیومکانیکی و تعاملات بین سلول‌ها و ماتریکس خارج سلولی به طور مستقیم بر شکل سلول‌ها تأثیر می‌گذارد [۷۰].

2- smart

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

۳-٤-۲- خواص بیولوژیکی

از خصوصیات ضروری هیدروژل‌های تزریقی برای کاربردهای مختلف پزشکی می‌توان به زیست سازگاری و غیر سمی بودن، خواص مکانیکی کافی، گرانروی مناسب، پایداری، زیست تخریب‌پذیری و ... اشاره نمود. هیدروژل باید خواص مکانیکی و بیولوژیکی مناسب داشته باشد و این خواص باید مشابه با بافتی باشد که جایگزین آن می‌شود [۷۱]. محققین در مطالعات متعددی تلاش کرده‌اند تا با استفاده از ترکیب روش‌های اتصال عرضی و الکترو ریسی به خواص مکانیکی و بیولوژیکی بهینه دست یابند [۷۲].

۵-۲- کابرد هیدروژل‌های در صنایع غذایی

۱-۵-۲- کنترل سیری و جایگزین‌های چربی و کربوهیدرات در فراورده‌های رژیمی

صنایع غذایی نیازمند استراتژی مؤثر برای تولید محصولات کم کالری با ویژگی‌های حسی مناسب می‌باشد. بسیاری از محصولات غذایی بر پایه امولسیون کالری نسبتاً بالایی دارند، در نتیجه ارائه راه حل برای کاهش کالری آن‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند که سس‌ها، پوشش‌های خوراکی، دسرها و چاشنی‌ها از این قبیل امولسیون‌ها هستند [۷۳].

۲-۵-۲- کپسوله کردن مواد بیواکتیو حساس به محیط و پروبیوتیک‌ها

کپسوله کردن مواد بیواکتیو حساس به محیط و پروبیوتیک‌ها در چند سال اخیر پیشرفت‌های چشم‌گیری در رابطه با توسعه‌ی سیستم‌های حامل دهانی به عنوان وسیله‌ای برای جلوگیری از بیماری و بهبود سلامت بشر صورت گرفته است. این حامل‌ها برای محافظت از اجزای بیواکتیو با هدف حفاظت مواد از شرایط شدید فرایندها طی تولید، بهبود ایمنی مواد غذایی از طریق ممانعت از رشد میکروارگانیسم‌ها، کمک به کیفیت حسی از طریق پوشاندن طعم‌های نامطلوب و و دسترسی بیولوژیکی طی فرایند هضم و جذب بهتر در منطقه هدف در صنایع مختلف دارویی، مکمل‌ها و صنایع غذایی استفاده می‌شوند[۷٤].

۳-۵-۲- استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی

هیدروژل‌های تولیدی از ماکرومولکول‌های زیستی ویژگی‌های مطلوبی برای فیلم‌های بسته‌بندی دارند چرا که زیست تخریب‌پذیر بوده و امکان الحاق سلول‌ها با مواد بیواکتیو و داروها را به دلیل ساختار شیمیایی گروه‌های عملکردی در پیکره هیدروژل مانند خود فراهم می‌کنند و مانند وسیله‌ای هوشمند قادر خواهند بود در برابر محرک‌های خارجی خاص مانند دمای محیط، pH و به طور کلی در برابر تغییرات محیط پیرامون پاسخگو باشند [۷۵].

کاربرد بیوپلیمرهای ساده نظیر نشاسته به دلیل مقاومت مکانیکی ضعیف محدود است. زمانی که یک هیدروژل خشک پوشش‌های بسته‌بندی شروع به جذب آب می‌کنند، هیدراته شدن بیشتر در قسمت‌های اسیدی و گروه‌های هیدروفیل رخ می‌دهد و باعث تورم هیدروژل خواهد شد. در نتیجه پوشش‌های هیدروژل‌های اولیه مقاومت رطوبتی پایین، استحکام کششی و تحمل بار کمی داشتند [۷٦]. برای غلبه بر این فاکتورهای نامطلوب می‌توان به اختلاط بیوپلیمرهای سنتزی و طبیعی و با اضافه کردن پرکننده‌های غیر آلی به این بیوپلیمرهای طبیعی و استفاده از نیروی مؤثر واکنش‌های بین مولکولی استفاده نمود.

۳- کامپوزیت پلی مرهای زیست تخریب‌پذیر

کامپوزیت پلی مرهای زیست تخریب‌پذیر موادی هستند که از ترکیبات زیستی و پلیمرهای تخریب‌پذیر تشکیل شده‌اند. این نوع کامپوزیت‌ها از موادی مانند سلولز، نشاسته و پلی‌لاکتید تشکیل شده و می‌توانند به راحتی تخریب شوند و به طبیعت برگردند. این ویژگی‌ها باعث شده که کامپوزیت پلی مرهای زیست تخریب‌پذیر به عنوان یک جایگزین سبز و پایدار برای مواد پلاستیکی سنتی مورد توجه قرار بگیرد. از این نوع کامپوزیت‌ها برای تولید انواع محصولات مانند بسته‌بندی‌های غذایی، ظروف یکبار مصرف و محصولات

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

دیگر استفاده می‌شود. کامپوزیت پلی مرهای زیست تخریب‌پذیر از دو بخش اصلی تشکیل شده است: یک بخش پلیمری که از منابع زیستی مانند نشاسته یا سلولز به دست می‌آید و بخش دیگری که ممکن است شامل مواد تقویت‌کننده یا مواد پرکننده باشد. این نوع کامپوزیت‌ها به دلیل تخریب‌پذیری و قابلیت بازیافت بالا، به عنوان یک گزینه پایدار و سازگار با محیط زیست مورد توجه قرار گرفته‌اند. از طرفی، این کامپوزیت‌ها همچنین از مزایای پلیمرهای زیستی مانند کاهش استفاده از منابع غیرتجدیدپذیر و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای برخوردارند. به طور کلی، کامپوزیت پلی مرهای زیست تخریب‌پذیر به عنوان یک گزینه سبز و پایدار برای مصارف مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند و می‌توانند به تحقق اهداف پایداری و حفاظت از محیط زیست کمک کنند[۳٤, ۷۷, ۷۸].

۱-۳- کاربرد:

کامپوزیت پلی مرهای زیست تخریب‌پذیر در بسیاری از صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند، از جمله بسته‌بندی‌های غذایی، ظروف یکبار مصرف، تولید محصولات پزشکی و بهداشتی، تولید تجهیزات وسایل نقلیه و ساخت قطعات صنعتی. این نوع کامپوزیت‌ها می‌توانند به عنوان جایگزینی برای مواد پلاستیکی سنتی مورد استفاده قرار گیرند و به دلیل تخریب‌پذیری و قابلیت بازیافت بالا، می‌توانند به کاهش آلودگی محیط زیست و مصرف منابع غیرتجدیدپذیر کمک کنند [۷۹].

از آنجایی که کامپوزیت پلی مرهای زیست تخریب‌پذیر از مواد زیستی تشکیل شده‌اند، زمانی که به محیط زیست منتقل می‌شوند، می‌توانند به راحتی تخریب شده و به زمین بازگردند، بدون اینکه به محیط زیست آسیب برسانند. این ویژگی‌ها آن‌ها را به گزینه‌ای پایدار و محیط زیستی می‌کنند [۸۰]. همچنین، با توجه به افزایش آگاهی‌ها در مورد حفاظت از محیط زیست و استفاده پایدار از منابع، استفاده از کامپوزیت پلی مرهای زیست تخریب‌پذیر در صنایع مختلف قابلیت گسترش دارد و می‌تواند به کاهش مشکلات زیست محیطی کمک کند [۸۱].

۲-۳- محدودیت استفاده

اگرچه کامپوزیت‌های پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر دارای مزایا و موارد استفاده‌ای گسترده هستند، اما نکات زیر می‌تواند به عنوان محدودیت‌های استفاده از آن‌ها مطرح شود:

۱. پایداری محیطی: اگر چه کامپوزیت‌های پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر تحت تأثیر عوامل محیطی مانند نور، حرارت و رطوبت قرار می‌گیرند، اما زمان لازم برای تخریب آن‌ها ممکن است بیشتر از زمان تخریب مواد زباله‌های زیستی باشد. این موضوع می‌تواند منجر به مشکلات زیست محیطی شود.

۲. عمر مفید: برخی از کامپوزیت‌های پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر ممکن است دارای عمر مفید کمتری نسبت به مواد پلاستیکی سنتی باشند. این ممکن است به عنوان یک محدودیت برای استفاده گسترده‌تر از آن‌ها مطرح شود.

۳. قیمت: هزینه تولید کامپوزیت‌های پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر ممکن است بیشتر از مواد پلاستیکی سنتی باشد، که می‌تواند به عنوان یک محدودیت اقتصادی برای برخی صنایع مطرح شود.

٤. بازیافت: هرچند کامپوزیت‌های پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر قابلیت بازیافت دارند، اما فرآیند بازیافت آن‌ها ممکن است پیچیده‌تر و گران‌تر از بازیافت مواد پلاستیکی سنتی باشد.

۵. ویژگی‌های فیزیکی: برخی از کامپوزیت‌های پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر ممکن است ویژگی‌های فیزیکی کمتری نسبت به مواد پلاستیکی سنتی داشته باشند، که ممکن است به عنوان یک محدودیت برای استفاده در برخی صنایع مطرح شود [۸۱].

۳-۳- کاربرد کامپوزیت پلی مرهای زیست تخریب‌پذیر در ساختار هیدروژل‌ها

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

کامپوزیت‌های پلیمری زیست تخریب‌پذیر به طور فزاینده‌ای در ساختار هیدروژل‌ها برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این کامپوزیت‌ها مزایایی مانند استحکام مکانیکی، پایداری و زیست سازگاری را ارائه می‌دهند. محققان بر روی ترکیب ساختارهای نانومقیاس در هیدروژل‌ها برای بهینه‌سازی خواص آن‌ها و افزایش عملکرد آن‌ها تمرکز کرده‌اند [۸۲]. هیدروژل‌های کامپوزیتی مبتنی بر پلی ساکارید (PCHs) به عنوان یک راه حل امیدوارکننده برای غلبه بر محدودیت‌های هیدروژل‌های مبتنی بر پلی ساکارید منفرد ظاهر شده‌اند. PCHها را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های فیزیکی و/یا شیمیایی به هم پیوستگی ساخت که منجر به بهبود پایداری و کارایی می‌شود [۸۳]. پلیمرهای مبتنی بر زیست به‌دست‌آمده از منابع طبیعی تجدیدپذیر به دلیل زیست تخریب‌پذیری، زیست‌سازگاری بودنشان مورد توجه قرار گرفته‌اند. این پلیمرها هنگامی که با هیدروژل‌ها ترکیب می‌شوند، می‌توانند موادی با خواص منحصر به فرد و اثرات هم افزایی ایجاد کنند [۸٤] هیدروژل‌های مبتنی بر نانوالیاف سلولزی به دلیل زیست سازگاری، چقرمگی مکانیکی و رفتار نازک شدن برشی در کاربردهای زیست پزشکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این هیدروژل‌ها را می‌توان اکسترود و چاپ زیستی کرد و آن‌ها را برای ذخیره‌سازی سلول‌های بنیادی و تحویل کنترل شده مناسب می‌کند [۸۵]. هیدروژل‌های کامپوزیتی که توسط پلی آسپارتیک اسید، آلژینات سدیم و مونت موریلونیت تشکیل شده‌اند برای کاربردهایی مانند جذب یون فلزات سنگین ساخته شده‌اند. این هیدروژل‌ها استحکام و پایداری مکانیکی بالایی دارند و مواد خام مورد استفاده در تهیه آن‌ها زیست سازگار و مقرون به صرفه هستند [۸٦].

٤- نانوذرات در صنایع غذایی

نانوذرات کاربردهای قابل توجهی در صنایع غذایی از جمله بسته‌بندی مواد غذایی، ایمنی مواد غذایی و امنیت غذایی دارند. نانوذرات، مانند نانو ذرات سلنیوم، به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و با موفقیت در زمینه‌های مختلف غذایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به عنوان عوامل ضد باکتری عمل می‌کنند و ماندگاری و شرایط نگهداری را بهبود می‌بخشند [۸۷]. ترکیب نانوذرات در لایه‌ها و پوشش‌های غذایی می‌تواند موادی با خواص ضد میکروبی قوی ایجاد کند و عمر ماندگاری محصولات غذایی را افزایش دهد [۸۸]. نانوذرات مبتنی بر فلز با خواص فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی خود، به عنوان مواد مناسب برای بسته‌بندی مواد غذایی شناسایی شده‌اند، اگرچه مهاجرت و سمیت همچنان نگران‌کننده است [۸۹]. نانوتکنولوژی همچنین کاربردهایی در نانوحسگرها برای تشخیص اجزای سمی در مواد غذایی و در توسعه نانومواد حاوی آنتی اکسیدان برای بسته‌بندی مواد غذایی پیدا می‌کند [۹۰]. نانوتکنولوژی جنبه‌های مختلف صنایع غذایی از جمله کپسوله‌سازی و توزیع مواد، بهبود طعم، معرفی نانوذرات ضد باکتری، ذخیره‌سازی طولانی‌مدت، تشخیص آلاینده‌ها و آگاهی مصرف‌کنندگان را بهبود بخشیده است [۹۱]. زمینه بسته‌بندی مواد غذایی فرصت‌های بزرگی را برای پیشرفت بیشتر از طریق توسعه نانومواد و نانوحسگرهای جدید دارد.

٤-۱- کاربرد نانوذرات در ساختار هیدروژل‌ها

از نانوذرات در ساختار هیدروژل‌ها برای افزایش خواص و عملکرد آن‌ها استفاده می‌شود. نانوذرات مبتنی بر کربن مانند نانولوله‌های کربنی، گرافن، نقاط کربنی و نانوالیاف کربنی در هیدروژل‌ها گنجانده می‌شوند تا هیدروژل‌های‌رسانا با خواص مکانیکی، الکتریکی و حسی بهبودیافته ایجاد کنند [۹۲]. ادغام نانوذرات آبگریز و آبدوست در هیدروژل‌ها می‌تواند ظرفیت جذب دارو را افزایش دهد و آن‌ها را برای استفاده به عنوان سیستم‌های دارورسانی مناسب سازد [۹۳]. نانوذرات PEDOT: PSS متبلور اسیدی به عنوان پرکننده‌های مقیاس‌پذیر و زیست‌سازگار برای هیدروژل‌های‌رسانا ایجاد شده‌اند که امکان ادغام همگن آن‌ها را در محلول‌های زیست‌مواد آبی و رزین‌ها بدون نیاز به افزودنی‌ها یا سورفکتانت‌ها فراهم می‌کنند [۹٤]. هیدروژل‌های نانوکامپوزیت، که با تعبیه نانوساختارها یا نانومواد در

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

هیدروژل‌ها شکل می‌گیرند، به عنوان حسگرهای کرنش برای کاربردهایی مانند نقشه‌برداری توزیع کرنش، تشخیص حرکت و پایش سلامتی امیدوارکننده هستند [۹۵]. نانوذرات سیلیکا پیوندی پلیمری برای بهبود خواص مکانیکی هیدروژل‌های نانوکامپوزیت استفاده شده است و آن‌ها را برای کاربردهای مهندسی بافت استخوان مناسب می‌سازد [۹۶].

۲-٤- محدودیت نانوذرات در ساختار هیدروژل‌ها

محدودیت نانوذرات در ساختار هیدروژل‌ها ظرفیت جذب ضعیف آن‌ها برای مولکول‌های آبدوست و آبگریز است. این به دلیل توانایی محدود شبکه ژل برای جذب این نوع مولکول‌ها است [۹۳]. با این حال، ادغام نانوذرات در هیدروژل‌ها می‌تواند ظرفیت جذب آن‌ها را افزایش دهد. هیدروژل‌های کامپوزیتی با نانوذرات آبگریز و آبدوست شامل فلزات (طلا، نقره)، اکسیدهای فلزی (آهن، آلومینیوم، تیتانیوم، زیرکونیوم)، سیلیکات‌ها (کوارتز) و کربن (گرافن) برای استفاده به عنوان حامل مناسب در نظر گرفته شده‌اند [۹۷]. تحویل کارآمد نانوذرات فلزی (NPs) موضوعی نگران‌کننده است و مطالعات اخیر نشان داده‌اند که هیدروژل‌ها توانایی بسیار خوبی برای انجام این کار دارند [۹۸]. ساختار هیدروژل متخلخل با قابلیت نگهداری آب بالا، مسیری کارآمد برای تحویل NPهای فلزی فراهم می‌کند و عفونت‌های باکتریایی ناشی از میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا مقاوم به چند دارو (MDR) را کاهش می‌دهد [۹۹].

نتیجه‌گیری

کامپوزیت‌های پلیمری زیست تخریب‌پذیر با نانوذرات در هیدروژل‌ها، به عنوان یک ترکیب پیشرفته در زمینه‌های مختلف شناخته شده‌اند. این کامپوزیت‌ها از ترکیب پلیمرهای زیست تخریب‌پذیر سازگار با محیط زیست و نانوذرات به عنوان تقویت‌کننده‌های مکانیکی و عملکردی بهره می‌برند. حضور نانوذرات در ساختار این کامپوزیت‌ها، خواص مکانیکی و نانومتریالی را بهبود بخشیده و به عنوان واسطه‌های کارآمد در انتقال مواد فعال به هیدروژل‌ها عمل می‌کنند. افزودن این کامپوزیت‌ها به هیدروژل‌ها، توانایی جاذب‌های آب را بهبود بخشیده و تخریب زیستی محصول را فراهم می‌کند. از این رو، این نوع کامپوزیت‌ها با پتانسیل بالا در زمینه‌های پزشکی، کشاورزی، و محیط زیست به کار گرفته می‌شوند. این ترکیبات نه تنها از لحاظ علمی و مهندسی نوآورانه هستند بلکه باعث حفظ محیط زیست و ایجاد راه‌حل‌های پایدار در فناوری‌های متنوعی می‌شوند. این کامپوزیت‌های پلیمری زیست تخریب‌پذیر با نانوذرات در هیدروژل‌ها نه تنها در جوانب مکانیکی و فیزیکی بلکه در زمینه‌های کاربردی نیز تأثیرگذار هستند. حضور نانوذرات در این کامپوزیت‌ها می‌تواند خواص الکتریکی و حرارتی آن‌ها را بهبود بخشد، که این امر از اهمیت بالایی در برخی از صنایع الکترونیکی و حسگرها دارد. این ترکیبات همچنین می‌توانند به عنوان حامل‌های اثربخش برای رهایش کنترل‌شده مواد فعال در زمان واقعی در سیستم‌های داروسازی مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، ویژگی‌های خاص هیدروژل‌ها به عنوان ماتریس اصلی در این کامپوزیت‌ها، امکان تطبیق با ساختارهای زنده را فراهم می‌کند و در کاربردهای پزشکی، به‌خصوص در تحقیقات ترمیم بافت و کاربردهای بافتی، کارآیی بسیار بالایی دارد. به طور کلی، کامپوزیت‌های پلیمری زیست تخریب‌پذیر با نانوذرات در هیدروژل‌ها ارتقاء یافته و یک پله مهم به سوی فناوری‌های پیشرفته و کاربردهای گسترده در زمینه‌های مختلف، از جمله پزشکی، محیط زیست، الکترونیک، و داروسازی، به‌شمار می‌رود.

۵-منابع

[1] Ullah, F., et al., *Classification, processing and application of hydrogels: A review.* Materials Science and Engineering: C, 2015. **57**: p. 414-433.

[2] Akhtar, M.F., M. Hanif, and N.M. Ranjha, *Methods of synthesis of hydrogels… A review.* Saudi Pharmaceutical Journal, 2016. **24**(5): p. 554-559.

[3] Zhang, Y.S. and A. Khademhosseini, *Advances in engineering hydrogels.* Science, 2017. **356**(6337): p. eaaf3627.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

[4] Bari, S.S., A. Chatterjee, and S. Mishra, *Biodegradable polymer nanocomposites: An overview*. Polymer Reviews, 2016. **56**(2): p. 287-328.

[5] Sani, I.K. and M. Alizadeh, *Isolated mung bean protein-pectin nanocomposite film containing true cardamom extract microencapsulation/CeO2 nanoparticles/graphite carbon quantum dots: Investigating fluorescence, photocatalytic and antimicrobial properties.* Food Packaging and Shelf Life, 2022. **33**: p. 100912.

[6] Carrillo-Inungaray, M.L., et al., *Use of nanoparticles in the food industry: advances and perspectives.* Impact of nanoscience in the food industry, 2018: p. 419-444.

[7] Naseer, B., et al., *Importance and health hazards of nanoparticles used in the food industry*. Nanotechnology Reviews, 2018. **7**(6): p. 623-641.

[8] Luksiene, Z., *Nanoparticles and their potential application as antimicrobials in the food industry*, in *Food preservation*. 2017, Elsevier. p. 567-601.

[9] Rasul, N.H., et al., *Development of antimicrobial/antioxidant nanocomposite film based on fish skin gelatin and chickpea protein isolated containing Microencapsulated Nigella sativa essential oil and copper sulfide nanoparticles for extending minced meat shelf life.* Materials Research Express, 2022. **9**(2): p. 025306.

[10] Sani, I.K., et al., *Cold plasma technology: Applications in improving edible films and food packaging.* Food Packaging and Shelf Life, 2023. **37**: p. 101087.

[11] Khodaei, S.M., et al., *Application of intelligent packaging for meat products: A systematic review.* Veterinary Medicine and Science, 2023. **9**(1): p. 481-493.

[12] Keerthiga, G., P. Gupta, and T.S. Santra, *Hydrogels: Biomaterials for Sustained and Localized Drug Delivery*. Nanomaterials and Their Biomedical Applications, 2021: p. 211-252.

[13] Omidian, H. and K. Park, *Introduction to hydrogels.* Biomedical applications of hydrogels handbook, 2010: p. 1-16.

[14] Nagam, S.P., et al., *A comprehensive review on hydrogels.* Int. J. Curr. Pharm. Res, 2016. **8**(1): p. 19-23.

[15] Wang, K. and Z. Han, *Injectable hydrogels for ophthalmic applications.* Journal of Controlled Release, 2017. **268**: p. 212-224.

[16] Su, J., *Thiol-mediated chemoselective strategies for in situ formation of hydrogels.* Gels, 2018. **4**(3): p. 72.

[17] Lyu, S., et al., *Optically controlled reversible protein hydrogels based on photoswitchable fluorescent protein Dronpa.* Chemical Communications, 2017. **53**(100): p. 13375-13378.

[18] Mironi-Harpaz, I., et al., *Photopolymerization of cell-encapsulating hydrogels: crosslinking efficiency versus cytotoxicity.* Acta biomaterialia, 2012. **8**(5): p. 1838-1848.

[19] Kurnia, J.C., E. Birgersson, and A.S. Mujumdar, *Analysis of a model for pH-sensitive hydrogels.* Polymer, 2012. **53**(2): p. 613-622.

[20] Nguyen, Q.V., J.H. Park, and D.S. Lee, *Injectable polymeric hydrogels for the delivery of therapeutic agents: A review.* European Polymer Journal, 2015. **72**: p. 602-619.

[21] Li, Y., et al., *A biodegradable starch hydrogel synthesized via thiol-ene click chemistry*. Polymer Degradation and Stability, 2017. **137**: p. 75-82.

[22] Guaresti, O., et al., *Synthesis of stimuli–responsive chitosan–based hydrogels by Diels–Alder cross–linkingclick reaction as potential carriers for drug administration.* Carbohydrate polymers, 2018. **183**: p. 278-286.

[23] Mathew, A.P., et al., *Injectable hydrogels for delivering biotherapeutic molecules.* International journal of biological macromolecules, 2018. **110**: p. 17-29.

[24] Bai, R., et al., *Fatigue fracture of tough hydrogels.* Extreme Mechanics Letters, 2017. **15**: p. 91-96.

[25] Riederer, M.S., et al., *Injectable and microporous scaffold of densely-packed, growth factor-encapsulating chitosan microgels.* Carbohydrate polymers, 2016. **152**: p. 792-801.

[26] Barba, B.J.D., C. Tranquilan-Aranilla, and L.V. Abad, *Hemostatic potential of natural/synthetic polymer based hydrogels crosslinked by gamma radiation.* Radiation Physics and Chemistry, 2016. **118**: p. 111-113.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

[27] Li, X., et al., *Low-temperature ionic conductivity enhanced by disrupted ice formation in polyampholyte hydrogels.* Macromolecules, 2018. **51**(7): p. 2723-2731.

[28] Ahmed, E.M., *Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review.* Journal of advanced research, 2015. **6**(2): p. 105-121.

[29] Khansari, M.M., et al., *Classification of hydrogels based on their source: a review and application in stem cell regulation.* JOM, 2017. **69**(8): p. 1340-1347.

[30] Li, L., et al., *Natural hydrogels for cartilage regeneration: Modification, preparation and application.* Journal of orthopaedic translation, 2019. **17**: p. 26-41.

[31] Nur, M. and T. Vasiljevic, *Can natural polymers assist in delivering insulin orally?* International journal of biological macromolecules, 2017. **103**: p. 889-901.

[32] Xue, J., et al., *Study on the degradation performance and kinetics of immobilized cells in straw-alginate beads in marine environment.* Bioresource technology, 2019. **280**: p. 88-94.

[33] Nasrullah, A., et al., *High surface area mesoporous activated carbon-alginate beads for efficient removal of methylene blue.* International journal of biological macromolecules, 2018. **107**: p. 1792-1799.

[34] Pirsa, S., et al., *Hydrogels and biohydrogels: investigation of origin of production, production methods, and application.* Polymer Bulletin, 2023. **80**(10): p. 10593-10632.

[35] Kekes, T. and C. Tzia, *Adsorption of indigo carmine on functional chitosan and β-cyclodextrin/chitosan beads: equilibrium, kinetics and mechanism studies.* Journal of environmental management, 2020. **262**: p. 110372.

[36] Farhadnejad, H., et al., *Facile preparation and characterization of pH sensitive Mt/CMC nanocomposite hydrogel beads for propranolol controlled release.* International journal of biological macromolecules, 2018. **111**: p. 696-705.

[37] Hossieni-Aghdam, S.J., et al., *Facile fabrication and characterization of a novel oral pH-sensitive drug delivery system based on CMC hydrogel and HNT-AT nanohybrid.* International journal of biological macromolecules, 2018. **107**: p. 2436-2449.

[38] Farhoudian, S., M. Yadollahi, and H. Namazi, *Facile synthesis of antibacterial chitosan/CuO bio-nanocomposite hydrogel beads.* International journal of biological macromolecules, 2016. **82**: p. 837-843.

[39] Lowe, B., et al., *Preparation and characterization of chitosan-natural nano hydroxyapatite-fucoidan nanocomposites for bone tissue engineering.* International journal of biological macromolecules, 2016. **93**: p. 1479-1487.

[40] da Silva Fernandes, R., et al., *Thermal, microstructural, and spectroscopic analysis of Ca2+ alginate/clay nanocomposite hydrogel beads.* Journal of Molecular Liquids, 2018. **265**: p. 327-336.

[41] Xu, Y., J. Han, and H. Lin, *Fabrication and characterization of a self-crosslinking chitosan hydrogel under mild conditions without the use of strong bases.* Carbohydrate polymers, 2017. **156**: p. 372-379.

[42] Makhado, E., S. Pandey, and J. Ramontja, *Microwave-assisted green synthesis of xanthan gum grafted diethylamino ethyl methacrylate: an efficient adsorption of hexavalent chromium.* Carbohydrate polymers, 2019. **222**: p. 114989.

[43] Makhado, E., et al., *Preparation and characterization of xanthan gum-cl-poly (acrylic acid)/o-MWCNTs hydrogel nanocomposite as highly effective re-usable adsorbent for removal of methylene blue from aqueous solutions.* Journal of colloid and interface science, 2018. **513**: p. 700-714.

[44] Pandey, S., *A comprehensive review on recent developments in bentonite-based materials used as adsorbents for wastewater treatment.* Journal of Molecular Liquids, 2017. **241**: p. 1091-1113.

[45] Yadollahi, M., et al., *Facile synthesis of chitosan/ZnO bio-nanocomposite hydrogel beads as drug delivery systems.* International journal of biological macromolecules, 2016. **82**: p. 273-278.

[46] Yadollahi, M., S. Farhoudian, and H. Namazi, *One-pot synthesis of antibacterial chitosan/silver bio-nanocomposite hydrogel beads as drug delivery systems.* International journal of biological macromolecules, 2015. **79**: p. 37-43.

[47] Zare-Akbari, Z., et al., *PH-sensitive bionanocomposite hydrogel beads based on carboxymethyl cellulose/ZnO nanoparticle as drug carrier.* International journal of

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

[48] biological macromolecules, 2016. **93**: p. 1317-1327.

[49] Gan, L., et al., *Graphene oxide incorporated alginate hydrogel beads for the removal of various organic dyes and bisphenol A in water*. Colloid and Polymer Science, 2018. **296**(3): p. 607-615.

[50] Cardelli, C., et al., *The role of directional interactions in the designability of generalized heteropolymers.* Scientific reports, 2017. **7**(1): p. 1-10.

[51] Garg, S., A. Garg, and R. Vishwavidyalaya, *Hydrogel: classification, properties, preparation and technical features.* Asian J. Biomat. Res, 2016. **2**(6): p. 163-170.

[52] Ahmadi, F., et al., *Chitosan based hydrogels: characteristics and pharmaceutical applications.* Research in pharmaceutical sciences, 2015. **10**(1): p. 1.

[53] Kim, S., et al., *Comprehensive examination of mechanical and diffusional effects on cell behavior using a decoupled 3d hydrogel system.* Macromolecular bioscience, 2017. **17**(9): p. 1700162.

[54] Quan, W.-Y., et al., *Mussel-inspired catechol-functionalized hydrogels and their medical applications.* Molecules, 2019. **24**(14): p. 2586.

[55] Yang, S., et al., *Preparation of highly porous metal–organic framework beads for metal extraction from liquid streams.* Journal of the American Chemical Society, 2020. **142**(31): p. 13415-13425.

[56] Muñoz-Bonilla, A., et al., *Chemical Hydrogels Bearing Thiazolium Groups with a Broad Spectrum of Antimicrobial Behavior*. Polymers, 2020. **12**(12): p. 2853.

[57] Tran, M., et al., *Release Kinetics and Antimicrobial Properties of Iodinated Species Liberated from Physically and Chemically Modified Starch Granules.* Starch-Stärke, 2020. **72**(1-2): p. 1900134.

[58] Wang, H., et al., *Preparation and characterization of multilayer films composed of chitosan, sodium alginate and carboxymethyl chitosan-ZnO nanoparticles.* Food chemistry, 2019. **283**: p. 397-403.

[59] Pereira, I., et al., *Regeneration of critical-sized defects, in a goat model, using a dextrin-based hydrogel associated with granular synthetic bone substitute*. Regenerative Biomaterials, 2021. **8**(1): p. rbaa036.

[60] Bardajee, G.R., et al., *Synthesis of magnetic multi walled carbon nanotubes hydrogel nanocomposite based on poly (acrylic acid) grafted onto salep and its application in the drug delivery of tetracyceline hydrochloride.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021. **616**: p. 126350.

[61] Eivazzadeh-Keihan, R., et al., *A novel biocompatible core-shell magnetic nanocomposite based on cross-linked chitosan hydrogels for in vitro hyperthermia of cancer therapy.* International journal of biological macromolecules, 2019. **140**: p. 407-414.

[62] Kurdtabar, M., et al., *Biocompatible magnetic hydrogel nanocomposite based on carboxymethylcellulose: synthesis, cell culture property and drug delivery.* Polymer Science, Series B, 2018. **60**(2): p. 231-242.

[63] Yegappan, R., et al., *Carrageenan based hydrogels for drug delivery, tissue engineering and wound healing.* Carbohydrate polymers, 2018. **198**: p. 385-400.

[64] Sun, X., et al., *pH-sensitive ZnO/carboxymethyl cellulose/chitosan bio-nanocomposite beads for colon-specific release of 5-fluorouracil.* International journal of biological macromolecules, 2019. **128**: p. 468-479.

[65] Chen, W., et al., *Self-assembly of the polymer brush-grafted silica colloidal array for recognition of proteins.* Analytical and bioanalytical chemistry, 2017. **409**(22): p. 5319-5326.

[66] Dsouza, S.D., et al. *Plasma Induced Non-Equilibrium Electrochemistry for Synthesis of Nitrogen Doped Carbon Quantum Dots Applied to Third-Generation Solar Cells*. in *ECS Meeting Abstracts*. 2020. IOP Publishing.

[67] Igweh, C., P. Patra, and A. Petryk, *Biocompatibility of Graphene Quantum Dots.* 2018.

[68] 67. Reshma, V. and P. Mohanan, *Quantum dots: Applications and safety consequences.* Journal of Luminescence, 2019. **205**: p. 287-298.

[69] Erol, O., et al., *Transformer hydrogels: a review.* Advanced Materials Technologies, 2019. **4**(4): p. 1900043.

[70] Chen, N., et al., *Cellulose-based injectable hydrogel composite for pH-responsive and*

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

controllable drug delivery. Carbohydrate polymers, 2019. **225**: p. 115207.

[71] Chen, Y., et al., *Highly mechanical properties nanocomposite hydrogels with biorenewable lignin nanoparticles.* International journal of biological macromolecules, 2019. **128**: p. 414-420.

[72] Llorens-Gámez, M., B. Salesa, and Á. Serrano-Aroca, *Physical and biological properties of alginate/carbon nanofibers hydrogel films.* International journal of biological macromolecules, 2020. **151**: p. 499-507.

[73] Nie, K., et al., *Enzyme-crosslinked electrospun fibrous gelatin hydrogel for potential soft tissue engineering.* Polymers, 2020. **12**(9): p. 1977.

[74] Munekata, P.E., et al., *Satiety from healthier and functional foods.* Trends in Food Science & Technology, 2021.

[75] Gharibzahedi, S.M.T. and B. Smith, *Legume proteins are smart carriers to encapsulate hydrophilic and hydrophobic bioactive compounds and probiotic bacteria: A review.* Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021. **20**(2): p. 1250-1279.

[76] Gregorova, A., et al., *Hydrothermal effect and mechanical stress properties of carboxymethylcellulose based hydrogel food packaging.* Carbohydrate polymers, 2015. **117**: p. 559-568.

[77] Qi, X., et al., *Facile formation of salecan/agarose hydrogels with tunable structural properties for cell culture.* Carbohydrate polymers, 2019. **224**: p. 115208.

[78] Sani, I.K., et al., *Value-added utilization of fruit and vegetable processing by-products for the manufacture of biodegradable food packaging films.* Food chemistry, 2023. **405**: p. 134964.

[79] Hassani, D., I.K. Sani, and S. Pirsa, *Nanocomposite Film of Potato Starch and Gum Arabic Containing Boron Oxide Nanoparticles and Anise Hyssop (Agastache foeniculum) Essential Oil: Investigation of Physicochemical and Antimicrobial Properties.* Journal of Polymers and the Environment, 2023: p. 1-12.

[80] Rogovina, S., *Biodegradable polymer composites based on synthetic and natural polymers of various classes.* Polymer Science Series C, 2016. **58**: p. 62-73.

[81] Dziadek, M., E. Stodolak-Zych, and K. Cholewa-Kowalska, *Biodegradable ceramic-polymer composites for biomedical applications: A review.* Materials Science and Engineering: C, 2017. **71**: p. 1175-1191.

[82] Smith, R., *Biodegradable polymers for industrial applications*. 2005: CRC press.

[83] Sandhya, P., M. Sreekala, and S. Thomas, *Nanobased Biodegradable Hydrogel for Biomedical Application.* Nano Hydrogels: Physico-Chemical Properties and Recent Advances in Structural Designing, 2021: p. 81-107.

[84] 83. Srivastava, N. and A.R. Choudhury, *Recent advances in composite hydrogels prepared solely from polysaccharides.* Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2021. **205**: p. 111891.

[85] Buwalda, S.J., *Bio-based composite hydrogels for biomedical applications.* Multifunctional Materials, 2020. **3**(2): p. 022001.

[86] Das, R., et al., *Geometrical control of degradation and cell delivery in 3D printed nanocellulose hydrogels.* Materials Today Communications, 2022. **30**: p. 103023.

[87] Vinchhi, P., S.U. Rawal, and M.M. Patel, *Biodegradable hydrogels*, in *Drug Delivery Devices and Therapeutic Systems*. 2021, Elsevier. p. 395-419.

[88] Ao, B., et al., *A review on synthesis and antibacterial potential of bio-selenium nanoparticles in the food industry.* Frontiers in Microbiology, 2023. **14**.

[89] Eremeeva, N.B., *Nanoparticles of metals and their compounds in films and coatings: A review.* 2023.

[90] Adeyemi, J.O. and O.A. Fawole, *Metal-based nanoparticles in food packaging and coating technologies: a review.* Biomolecules, 2023. **13**(7): p. 1092.

[91] Ozcakir, G., *Applications of Nanomaterials in Food Industry: A Review.* Materials Proceedings, 2023. **14**(1): p. 22.

[92] Singh, R., et al., *Future of nanotechnology in food industry: Challenges in processing, packaging, and food safety.* Global Challenges, 2023. **7**(4): p. 2200209.

[93] Zhang, S., et al., *Conductive hydrogels incorporating carbon nanoparticles: A review of synthesis, performance and applications.* Particuology, 2023.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

[94] Zhivkov, A.M., T.T. Popov, and S.H. Hristova, *Composite Hydrogels with Included Solid-State Nanoparticles Bearing Anticancer Chemotherapeutics.* Gels, 2023. **9**(5): p. 421.

[95] Tropp, J., et al., *Conducting polymer nanoparticles with intrinsic aqueous dispersibility for conductive hydrogels.* Advanced Materials, 2023: p. 2306691.

[96] Yue, Y., *Nanocomposite Hydrogels for Strain Sensing Based on Optical and Electrical Signals: A Review.* Chemical Communications, 2023.

[97] Mohammed, A.A., et al., *Nanocomposite Hydrogels with Polymer Grafted Silica Nanoparticles, Using Glucose Oxidase.* Gels, 2023. **9**(6): p. 486.

[98] Moreno Ruiz, Y.P., et al., *Advanced Hydrogels Combined with Silver and Gold Nanoparticles against Antimicrobial Resistance.* Antibiotics, 2023. **12**(1): p. 104.

[99] Doan, V.S., et al., *Confinement-dependent diffusiophoretic transport of nanoparticles in collagen hydrogels.* Nano letters, 2021. **21**(18): p. 7625-7630.

[100] Baik, J.S., et al., *Colloidal supraballs of mesoporous silica nanoparticles as bioresorbable adhesives for hydrogels.* Chemistry of Materials, 2022. **34**(2): p. 584-593.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]

Journal of Food Science and Technology (Iran)

Homepage:www.fsct.modares.ir

Scientific Research

Composite of biodegradable polymers and nanoparticles in hydrogels: review and their performance

Amin Abolghasemi Mahani

Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of kerman, Kerman, Iran

.

ARTICLE INFO

Article History:
Received:2023/12/27
Accepted:2024/2/5

Keywords:

polymer composite,

biodegradable,

nanoparticles,

hydrogel

DOI: **10.22034/FSCT.21.149.140.**

*Corresponding Author E-Mail:
a.m.abolghasemi@uk.ac.ir

ABSTRACT

This study was conducted with the aim of investigating the composite of biodegradable polymers and nanoparticles in hydrogels in the form of a review article. Biodegradable polymer composites with nanoparticles in hydrogels is an advanced research field that combines the accumulation of new technologies in the field of biodegradable polymers and nanomaterials. These composites are created by integrating biodegradable polymers, which decompose naturally and reduce the harmful effects on the environment, with nanoparticles in hydrogels. The presence of nanoparticles in the structure of these composites has improved the mechanical, electrical, and thermal properties and made these compounds as multifunctional materials with wide applications in the fields of food industry, packaging, medicine, environment, and electronics. Hydrogel, as the main matrix of these composites, guarantees the ability of absorbing water and the controlled transfer of active substances. These advances are important not only in the field of science and engineering, but also in making sustainable solutions for future technologies.

[Downloaded from fsct.modares.ac.ir on 2024-12-26]

[DOI: 10.22034/FSCT.21.149.140]