

Лекція 7. «Зелений» синтез наночастинок металів: Ag, Au, Pt, Pd

7.1. Наночастинки Ag

З благородних металевих наночастинок срібні наночастинки (AgNPs) найбільш широко визнані за їх застосування в різних областях, таких як фотоніка, мікроелектроніка, фотокаталіз, медицина та літографія. Наприклад, загальне використання AgNPs у медицині можна віднести до їх потужної антимікробної активності проти широкого кола патогенних мікроорганізмів. Різні фізичні та хімічні методи, включаючи лазерну абляцію, літографію та фотохімічну редукцію, ефективно використовують для отримання великої кількості AgNPs. Тим не менше, ці методи залишаються порівняно дорогими та іноді передбачають використання деяких небезпечних речовин. Отже, розробка «зелених» та «ефективних» методів отримання AgNPs має велике значення [1].

В останні роки синтез наночастинок срібла за допомогою біологічних процесів привертає значну увагу. Використання рослин і рослинних екстрактів є одним з найбільш бажаних методів «зеленого» біологічного синтезу завдяки їх багатим біологічно активним метаболітам. У дослідженні [2] наночастинки срібла (AgNPs) були синтезовані за допомогою екстракту гриба рейши (*Ganoderma lucidum*). 20 мл грибного екстракту розбавляли до 100 мл додаванням дистильованої води. Згодом до суміші додавали 15 мг солі AgNO_3 і залишали з магнітною мішалкою для відновлення іонів Ag^+ до Ag^0 (перехід від прозорого до коричнево-червоного забарвлення розчину). В УФ-видимому спектрі виявився широкий пік поглинання між 400-460 нм, що вказує на існування наночастинок AgNPs. Зображення TEM показали, що наночастинки є сферичними з діаметром 15-22 нм. Вивчалася антиоксидантна активність до 1-дифеніл-2-пікрилгідразилу (DPPH). Найвищий відсоток очищення DPPH (76,45%) був зафіксований при 250 мг/л. Результати активності розщеплення ДНК вказували на те, що «зелені» AgNPs спричиняли розщеплення одноразової ДНК протягом 30 та 60 хв. при 50 та 100 мг/л відповідно. Наночастинки AgNPs виявляли сильну антибактеріальну дію проти грам-позитивних (*S. aureus*, *E. hirae*, *B. cereus*) та грам-негативних (*E. coli*, *P. aeruginosa*, *L. pneumophila subsp. Pneumophila*) бактерій. Крім того, було показано, що AgNPs також мають високу протигрибкову дію проти грибка *C. albicans*.

У роботі [3] представлений простий метод «зеленого» синтезу наночастинок AgNPs, використовуючи в якості відновлюючого та стабілізуючого агента полісахарид, витягнутий з червоних водоростей *Gracilaria birdiae*. AgNPs готували, використовуючи три концентрації полісахаридів (0,02, 0,03 та 0,05 % об./об.) та два рН (10 і 11) при перемішуванні протягом 30 хв. при 90 °С. УФ-спектр поглинання показав поверхневий пік плазмону при 410 нм, що є характерним піком наночастинок срібла. Стійкість синтезованих наночастинок AgNPs аналізували протягом чотирьох місяців, значної агломерації не спостерігалось. Гідродинамічний діаметр AgNPs коливався між 20,2 нм і 94,9 нм. AgNPs були протестовані на антимікробну активність за допомогою кишкової палички (грам-негативної бактерії) та золотистого стафілокока (грам-позитивної бактерії): всі зразки виявляли антимікробну активність щодо кишкової палички. Отримані результати свідчать про те, що синтезовані наночастинок срібла, за участю полісахариду, можуть бути використані як модель для майбутніх проектів нанопрепаратів або систем доставки ліків.

Автори [4] синтезували AgNPs з використанням висушеної трави. Відходи на основі висушеної трави промивали чистою водою. Їх поверхню протягом 4 хв. дезінфікували розчином гіпохлориту натрію. Потім траву двічі промивали дистильованою водою протягом 2 хв. Далі зразки поміщали в 70%-ний спирт на 2 хв. і одразу промивали стерилізованою деіонізованою водою три рази. 20 г чистої та сухої трави додавали в колбу Ерленмейєра (250 мл), що містила 100 мл деіонізованої води, і кип'ятили протягом 15 хв. при кімнатній температурі. Отриманий екстракт фільтрували за допомогою фільтрувального паперу з целюлози і витримували при 4 °С. До 15 мл екстракту додавали різні об'єми нітрату срібла 0, 450, 1125, 1800 та 2250 мкл на основі розчину нітрату срібла (0,1 моль); потім кінцевий об'єм реакційної суміші (екстракт + нітрат срібла) доводили до 45 мл деіонізованою водою, що призводило до отриманих кінцевих концентрацій нітрату срібла 0, 1, 2,5, 4 та 5 мМ·мкг/мл відповідно. Реакційну суміш витримували в темряві при 28 °С. Середній розмір наночастинок срібла становив приблизно 15 нм. Протипухлинну, протигрибкову та антибактеріальну дію AgNPs вивчали *in vitro*. Мінімальна інгібіторна концентрація AgNPs проти *Pseudomonas aeruginosa* та *Acinetobacter baumannii* була обчислена приблизно 3 мкг/мл. Найвищий рівень інгібуючої дії AgNPs проти *Fusarium solani* був близьким до 90% при

концентрації 20 мкг/мл AgNPs. При збільшенні концентрації AgNPs до 5 мкг/мл досягається гальмівний вплив на ріст ракових клітин, виживання ракових клітин знижується приблизно на 30%.

У дослідженні [5] приведений «зелений» екологічно чистий метод біогенного синтезу наночастинок срібла AgNPs з використанням плодового екстракту *Gmelina arborea*. До 30 мл водного розчину AgNO₃ (1,0 мМ) додали 0,1 мл фруктового екстракту. Потім розчин нагрівали на плиті з магнітною мішалкою при 60 °С при безперервному перемішуванні при 1000 об./хв. Протягом 5 хв. колір розчину змінювався від безбарвного до жовтуватого. Утворення наночастинок AgNPs досліджувалося за допомогою зчитування УФ-видимих спектрів через однаковий проміжок часу. Холосту пробу готували, беручи 30 мл дистильованої води замість нітрату срібла. Кількість доданого екстракту плодів коливалася від 0,1 до 1,0 мл. Дослідження TEM показали, що синтезовані AgNPs були стабільними, майже сферичними та кристалічними, розмір частинок коливався від 8 до 32 нм. Середній діаметр частинок становив $17,0 \pm 1,6$ нм. Каталітичну ефективність підготовленого «зеленого» каталізатора AgNPs досліджували при каталітичній деградації барвника метиленового синього. Реакцію каталітичної деградації завершували протягом 10 хв., що означає відмінні каталітичні властивості наночастинок срібла.

У статті [6] ультрамаленькі наночастинок Ag були синтезовані за «зеленою» та прямолінійною біогенною методикою з використанням екстракту листя *Mentha aquatica*. Фітохімічні речовини, наявні в екстракті, можуть відновлювати іони Ag⁺ до Ag⁰ і утворювати наночастинок. Синтез AgNPs проводили у присутності розчину AgNO₃ та при різному рН (9, 9,5, 10 та 10,5), об'єм розчину AgNO₃ до екстракту листя *Mentha aquatica* (0,1:0,9, 0,3:0,7, 0,5:0,5, 0,7:0,3, 0,9:0,1 мл/мл), температури (25, 40, 70, 90 °С) і потужність ультразвуку (50, 100, 150 і 200 Вт). До 19 мл води додавали 0,5 мл екстракту листя, рН регулювали додаванням 0,2 М розчину K₂CO₃. На наступному етапі в реакційну посудину по краплях додавали 0,5 мл водного розчину AgNO₃ (100 мМ), який безперервно перемішували на магнітній мішалці або під ультразвуком із сильнодіючим ультразвуковим генераторним інструментом, оснащеним титановим наконечником. Утворення AgNPs через відновлення Ag⁺ до Ag⁰ відстежувалося через різні проміжки часу за допомогою УФ-спектроскопічного аналізу. Для запобігання непотрібних фотохімічних реакцій реакційну посудину

накривали алюмінієвою фольгою. Також весь скляний посуд промивали сумішшю розчинів HCl та HNO₃ (HCl:HNO₃=3:1 об./об.) і потім промивали деіонізованою водою та етанолом і сушили в печі при 100 °C. Отримані AgNPs тричі промивали деіонізованою водою, використовуючи центрифугування при 16000 об./хв. Ефективні параметри синтезу були повністю оптимізовані для досягнення невеликих наночастинок. Результати показали, що застосування ультразвуку під час синтезу може призвести до менших AgNPs (8 нм) з посиленою антибактеріальною активністю за рахунок зниження мінімальної інгібіторної концентрації. Зокрема, значення мінімальної інгібіторної концентрації для синтезованих AgNPs з ультразвуком проти *P. aeruginosa*, *E. coli*, *B. cereus* та *S. aureus* склали 2,2, 58, 20 та 198 мкг/мл. Крім того, синтезовані ультразвуком AgNPs демонстрували значну каталітичну активність для видалення різних типів барвників як забруднювачів навколишнього середовища.

У [7] «зелений» синтез наночастинок срібла був досягнутий шляхом біовідновлення нітрату срібла за допомогою водного екстракту листа *Parkia speciosa*. Біологічне відновлення AgNO₃ було перевірено, коли колір розчину змінився на коричневий: до 1 мл екстракту листа *Parkia speciosa* додали 1 мл 0,01 М розчину AgNO₃ у мірну колбу об'ємом 10 мл, об'єм довели до 10 мл деіонізованою водою і витримували при температурі навколишнього середовища (25±0,5 °C) протягом 24 год. Синтезовані AgNPs збирали після центрифугування при 10000 об./хв. протягом 15 хв. Утворення AgNPs було підтверджено УФ-спектроскопією. Синтезовані наночастинок срібла в розчині показали максимальне поглинання при 410,5 нм. Аналіз СЕМ і ТЕМ використовували для підтвердження середнього розміру наночастинок AgNPs, які виявилися відповідно 31 нм і 35 нм. Синтезовані AgNPs виявляли значну фотокаталітичну (деградація барвника метиленового синього при сонячному опроміненні), антимікробну (*Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* та *Bacillus subtilis*) та антиоксидантну активності. Синтезовані наночастинок AgNPs можуть використовуватися у сферах очищення води, біомедицини, біосенсору та нанотехнологій.

У роботі [8] автори досліджують фітохімічний, антиоксидантний та антимікробний потенціал водних та метанолових екстрактів фруктів *Nauclea latifolia* (африканський персик) та його застосування в біосинтезі наночастинок срібла та для рецептур холодного крему. Екстракти викори-

стовували для біовідновлення нітрату срібла до наночастинок срібла. 100 мл свіжоприготовованого 1 мМ розчину нітрату срібла (AgNO_3) додавали до 40 мл (0,1 г/10 мл) рослинного екстракту в 250 мл колбі Ерленмейєра. Суміш інкубували протягом 24-72 год. Після інкубації суміш, що містила наночастинок срібла, центрифугували і гранули ліофілізували. Фітохімічна оцінка сирих екстрактів *Nauclea latifolia* показала наявність алкалоїдів, флавоноїдів, сапонінів, терпеноїдів, антрахінонів та стероїдів, дубильних речовин та глікозидів. Пік поверхневого плазмонного резонансу становив 350 нм, а такі функціональні групи як гідроксильна, карбоксильна, алкілгалогенідна, фенольна, амінна, карбонільна та амідна, були важливими для біоредукції та укупорки іонів срібла в наночастинок. Аналіз показав, що срібло є основним елементом, а наночастинок мають неправильну форму та розмір 12 нм. Сформовані креми були стійкими, косметично привабливими із задовільним рН, в'язкістю та нанесенням. Наночастинок срібла на основі водних екстрактів *Nauclea latifolia* та його кремевий склад проявляли потужну антимікробну та антиоксидантну активність.

7.2. Наночастинок Au

Наночастинок золота (AuNPs) вважаються найпривабливішими членами благородних металевих наночастинок завдяки їх потенційному застосуванню в різних областях, таких як каталіз, нелінійна оптика, наноелектроніка, експресія генів та діагностика захворювань. Широке використання AuNPs у багатьох біомедичних областях викликало значну зацікавленість у нагальній необхідності в методах синтезу AuNPs без використання небезпечних хімічних речовин [1].

Альтернативні методи, включаючи «зелені» синтетичні підходи для отримання наночастинок золота, важливі для підтримання сталого розвитку. Позаклітинні або внутрішньоклітинні екстракти грибів є ідеальними кандидатами для синтезу наночастинок металу завдяки масштабованості та економічній ефективності росту грибів навіть у промислових масштабах. Існує кілька методів і прийомів, які використовують фракції, що походять з грибів, для «зеленого» синтезу наночастинок золота. У дослідженні [9] показуються та порівнюються результати трьох різних підходів до синтезу наночастинок золота з використанням або позаклітинної фракції, або автолізу гриба, або внутрішньоклітинної фракції 29 термофільних грибів (рис. 14). Досліджено утворення наночастинок з різними розмірами (від

6 нм до 40 нм) та розподілом розмірів (зі стандартними відхиленнями в межах від 30% до 70%) залежно від штаму грибів та експериментальних умов. За допомогою технології ультрацентрифужної фільтрації виявлено, що розмір відновлюючих речовин менше 3 kDa, а розмір молекул, які здатні ефективно стабілізувати наночастинки, перевищує 3 kDa.

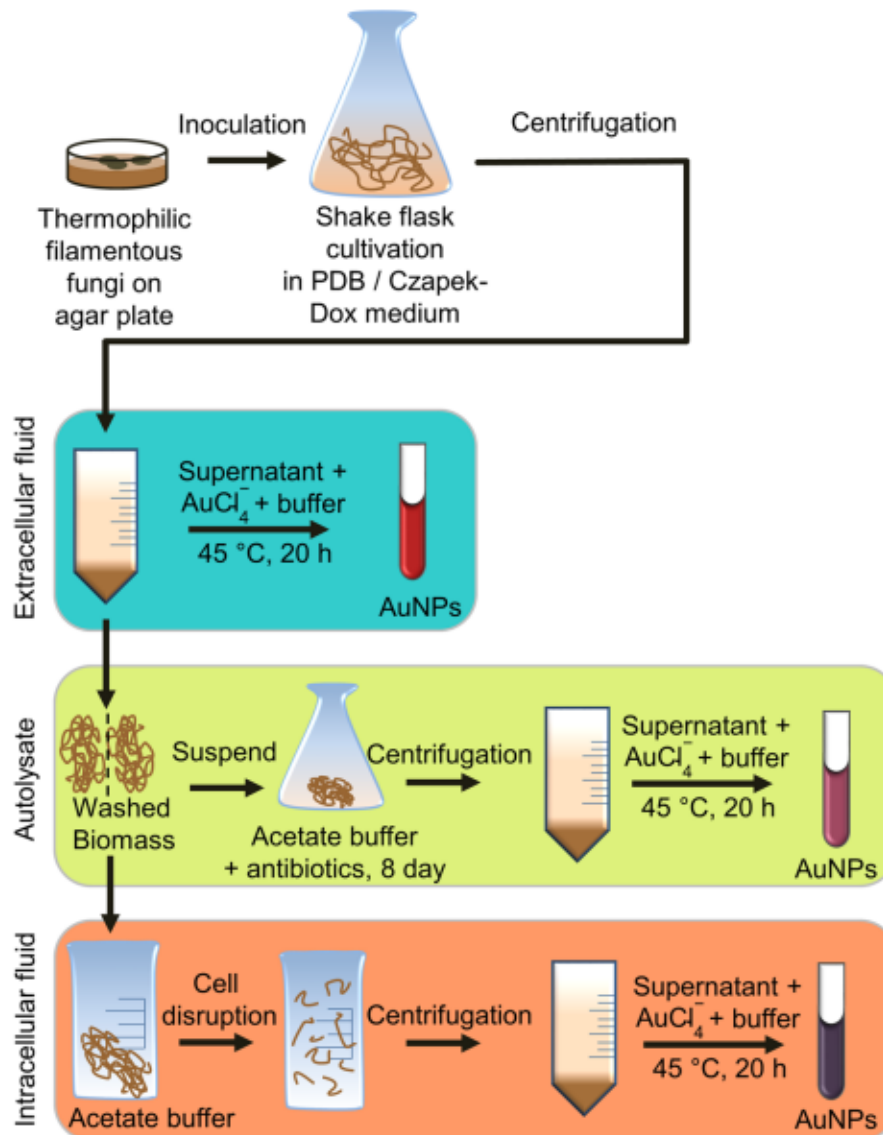


Рис. 14. Схема приготування екстрактів із грибів та синтезу AuNPs [9].

У роботі [10] наноструктури типу «ядро – оболонка» $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Au}$ були побудовані за допомогою вдосконаленого методу двоступеневого синтезу з екстракту зеленого лущиння *Juglans regia* (волоський горіх). Для синтезу $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Au}$ наночастинки оксиду заліза суспендували в розчині HAuCl_4 , а молярне співвідношення в розчині доводили до 1:1. Наночастинки оксиду заліза, суспендовані в розчині HAuCl_4 , озвучувались протягом 20 хв.

Екстракт *J. regia* додавали в якості відновлюючого і стабілізуючого засобу. Далі, Fe₃O₄/Au автоклавували протягом 20 хв. при 120 °С, супернатант відкидали і сушили в сушильній шафі при 60 °С. Середній діаметр наночастинок Fe₃O₄/Au, синтезованих методом спільного осадження, становив 6,08 ± 1,06 нм. Це дослідження показує, що фізичні та структурні властивості наночастинок Fe₃O₄/Au мають внутрішні властивості золота та магнетиту. Наночастинки мають високу намагніченість насичення та низьку коерцитивність завдяки магнітним властивостям. Наночастинки Fe₃O₄/Au демонструють інгібуючу концентрацію (IC) 50 у 235 мкг/мл проти клітин колоректального раку (HT-29). Під час тестування на неракові клітини IC50 не було досягнуто навіть до 500 мкг/мл. Це дослідження підкреслює, що наночастинки Fe₃O₄/Au можуть бути ідеальними кандидатами для лікування раку та інших біомедичних застосувань.

У [11] повідомляється про «зелений» хімічний підхід до синтезу наночастинок золота (AuNPs) з використанням *Caulerpa racemosa* (Cr) (рис. 15). Cr@AuNPs синтезували додаванням 50 мл екстракту *C. racemosa* до 50 мл 1 мМ розчину HAuCl₄ при перемішуванні (24 год.). Синтез наночастинок Cr@AuNPs підтверджувався зміною кольору розчину. Після завершення реакції синтезований розчин Cr@AuNPs центрифугували при 10000 об./хв. протягом 30 хв. (4 °С). Отримані Cr@AuNPs промивали та диспергували у воді Міліпора. Наночастинки Cr@AuNPs демонстрували піковий поверхневий плазмонний резонанс при 528 нм в УФ-видимому спектрі. Наявність фітохімічних компонентів у водному екстракті *C. racemosa* підтверджено ІЧ-спектроскопічним аналізом. Розмір Cr@AuNPs коливався від 13,7 до 85,4 нм. Синтезовані наночастинки Cr@AuNPs ефективно контролювали ріст клітин аденокарциноми товстої кишки людини (HT-29), і вони виявляли IC 50 у 20,84 мкг/мл. «Зелені» синтезовані Cr@AuNPs проявляли нетоксичний вплив на *Artemia nauplii*, навіть при високій концентрації Cr@AuNPs (100 мкг/мл).

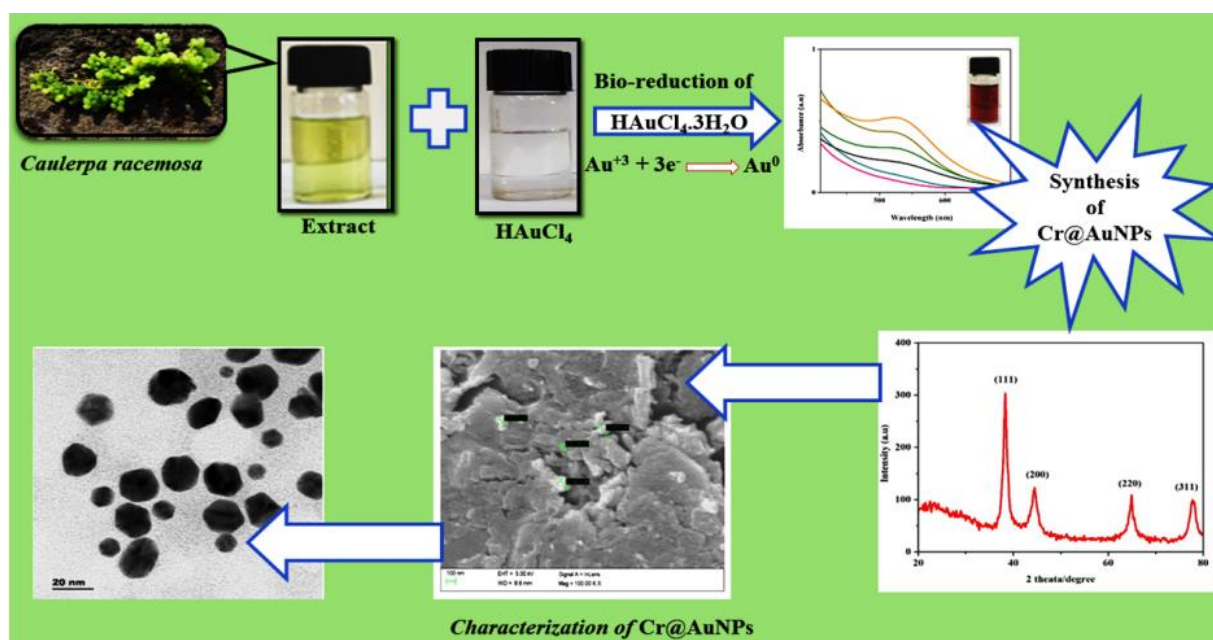


Рис. 15. Механізм синтезу з використанням екстракту [11].

Автори [12] розробили «зелений», екологічно чистий, швидкий та простий синтез наночастинок золота (AuNPs) з використанням водного екстракту *Sumac* як відновника для іонів золота, а також добре утримуючого агента для біоутворених AuNPs. 50 мл 0,1 мМ розчину $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ вступав у реакцію з 50 мл водного екстракту *Sumac* протягом 40 хв. при безперервному перемішуванні при 40 °C і потім залишався витримуватися при температурі навколишнього середовища ще 1 год. Фіолетовий твердий продукт відокремлювали від розчину центрифугуванням при 8000 об./хв. протягом 15 хв. і обережно промивали дистильованою водою. Кінцевий зразок висушувався при 45 °C. Результат TEM показав, що біосформовані наночастинок AuNPs мають сферичну форму середнього розміру $20,83 \pm 4,4$ нм. Дослідження антиоксидантної активності *in vitro* показали, що активність DPPH (2,2-дифеніл-1-пікрилгідразил) та ABTS (2,2'-азино-біс-3-етилбензтіазолін-6-сульфонова кислота) зростала залежно від дози. Біосинтезовані наночастинок можуть бути корисними у фармацевтичних та біомедичних застосуваннях.

7.3. Наночастинок Pt

Останнім часом наночастинок платини (PtNPs) широко використовуються у процесах окиснення та гідрування в нафтохімічній промисловості. Це пояснюється великою площею поверхні та багатьма іншими характеристиками, які спонукають до синтезу PtNPs для каталітичних

застосувань. Отже, зростає потреба в розробці процесів синтезу PtNPs, які не використовують токсичні хімічні речовини та використовують інші екологічно чисті матеріали [1].

У дослідженні [13] описано «зелений» шлях біосинтезу наночастинок платини (PtNPs) з використанням екстракту листя *Xanthium strumarium*. 10 мл екстракту листя *Xanthium strumarium* додали до 190 мл 1 мМ водного $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Суміш нагрівали при 100 °С у герметичній колбі протягом 1 год.. Через 10 хв. зміна кольору суміші від блідо-жовтого до темно-коричневого показала утворення наночастинок платини. Відновлений платиновий розчин піддавали ультразвуковій дії протягом 30 хв. для відділення підготовлених наноматеріалів платини від біомолекул, присутніх у екстракті листя *Xanthium strumarium*. Після ультразвуку розчин фільтрували, промивали дистильованою водою, повторюючи декілька разів для видалення домішок, і висушували. Аналіз TEM показав утворення наночастинок середнього розміру 22 нм, а SEM чітко показав, що утворені наночастинок PtNPs мають кубічну та прямокутну форму та гладку поверхню. Наночастинок виявили потужний цитотоксичний ефект щодо клітинних ліній раку HeLa зі значенням IC 50 90 мкг/мл/24 год.

Dobrucka [14] представила «зелений» синтез наночастинок платини з використанням екстракту *Fumariae herba*. 4 г висушеної і порошкоподібної трави поміщали в 180 мл подвійної дистильованої води. Суміш витримували при 90 °С протягом 45 хв. при енергійному магнітному перемішуванні. Свіжий екстракт використовувався одразу після фільтрування через фільтрувальний папір №1 Whatman. Далі до 10 мл підготовленого екстракту додавали 0,004 г K_2PtCl_6 . Розчин перемішували магнітною мішалкою протягом 4 год. при температурі 50 °С. Колір змінювався від жовтого до коричневого, що свідчило про утворення наночастинок PtNPs. Аналіз TEM показав шестикутну та п'ятикутну форму синтезованих наночастинок розміром близько 30 нм. Наночастинок платини (PtNPs) виявляли хороші каталітичні властивості при відновленні метиленового синього та фіолетового кристалу.

У роботі [15] «зелений» синтез наночастинок платини з використанням екстрактного розчину фініків (біорозкладна ПАР) проводився для вивчення їх впливу на різні ракові клітини. Водні екстракти розчинів популярних фініків Ajwa і Barni діють як стабілізатори та відновники при синтезі PtNPs в умовах навколишнього середовища. Для досягнення найкращого розміру

та форми наночастинок змішували та розробляли різні співвідношення екстракту та солі металів. Розмір отриманих PtNPs був невеликим, в діапазоні 1,3-2,6 нм. Крім того, наночастинки різної величини забезпечувались зміною рН реакції. Протипухлинну активність PtNPs оцінювали для різних ракових клітин, включаючи клітини карциноми товстої кишки (HCT-116), клітини молочної залози (MCF-7) та гепатоцелюлярну карциному (HePG-2). Для дослідження антибактеріального впливу застосовували антибактеріальні засоби Ампіцилін та Гентаміцин. Для визначення антибактеріального застосування PtNPs були використані грам-негативні бактерії: *Escherichia coli* (RCMB 010052) та грам-позитивні бактерії: *Bacillus subtilis* (RCMB 010067). Встановлено, що синтезовані PtNPs гальмують ріст *Escherichia coli* та *Bacillus subtilis*.

7.4. Наночастинки Pd

Каталітичні властивості та спорідненість до водню наночастинок паладію (PdNPs) викликають неабиякий інтерес. PdNPs використовуються у різних унікальних програмах, зокрема датчиках та активних мембранних каталізаторах. Наночастинки PdNPs синтезуються за допомогою різних вологих хімічних підходів, включаючи методи хімічного відновлення, електрохімічні та поліольні методи [1].

«Зелений» синтез наночастинок паладію (PdNPs) для каталізу та біологічних застосувань викликає великий інтерес. Для заміни складних рослинних екстрактів лентінан (LNT) може бути хорошим відновлюючим і стабілізуючим агентом. У роботі [16] перевірений простий і «зелений» метод синтезу PdNPs з використанням LNT. Отримані в результаті наночастинки паладію PdNPs, які стабілізовані LNT (Pd_n-LNT NPs), мали невеликі розміри (2,35-3,32 нм). Pd_n-LNT NPs були стабільними у розчині протягом 7 днів. Крім того, Pd_n-LNT NPs мали більш високу каталітичну активність щодо відновлення 4-нітрофенолу, ніж інші каталізатори. Що ще важливіше, наночастинки Pd_n-LNT NPs мали незначну цитотоксичність щодо клітин і виявляли хорошу антиоксидантну активність.

Автори [17] синтезували каталітично активні нановолокна циклодекстрину (CD), які завантажені наночастинами паладію *in situ* (PdNPs), методом електроспінінгу розчину. Циклодекстрин діяв як відновник і каталізував утворення наночастинок паладію при відновленні від Pd²⁺ до металевого Pd⁰, не вимагаючи жодного іншого відновника. Нановолокна

отримували електроспінінгом молекул CD з водних розчинів та DMF, що містили два різних навантаження Pd (1 і 2 мас.% відносно CD). Результати дослідження підтвердили наявність гомогенно розподілених полікристалічних PdNPs в діапазоні розмірів 3-5 нм у всій матриці з нановолокна та продемонстрували наявність більшої частки металевого атома Pd⁰ за рахунок ефективного відновлення Pd²⁺ молекулами CD. Каталітична дія PdNPs досліджувалася через відновлення *n*-нітрофенолу до *n*-амінофенолу, в результаті чого спостерігалася висока каталітична активність нановолокон.

У дослідженні [18] нанорозмірні частинки паладію синтезовані новим, одностадійним та економічно ефективним методом з високим виходом – мікрохвильовим опроміненням з використанням смоли дерева Neem. Водорозчинна смола була використана як стабілізуючий та відновлюючий агент без шкідливих хімічних речовин для отримання PdNPs. Зібрану смолу очистили і ретельно промили подвійною дистильованою водою. Далі 1 г розчиняли у 100 мл подвійної дистильованої води. Аліквоту 50 мл водного розчину H₂PdCl₄ (5·10⁻⁴ М) змішували з 50 мл 1% водного розчину смоли у склянці. Реакцію проводили в мікрохвильовій печі при 320 Вт протягом 10 хв. Середній розмір частинок становив близько 4 нм. ІЧ-спектри підтвердили, що гідроксильні та карбонові групи беруть участь у відновленні та стабілізації процесу. Каталітичну активність PdNPs досліджували спектрофотометрично за допомогою відновлення барвника родаміну 6G за допомогою NaBH₄. Наночастинки PdNPs, стабілізовані смолою дерева Neem, демонстрували відмінну каталітичну активність щодо відновлення родаміну 6G (18 хв.). Реакція показала кінетику псевдо першого порядку, а отримана константа швидкості становила 0,1875 хв⁻¹.

Література

- [1] E. El- Sherbiny, I.M. and Salih, Green Synthesis of Metallic Nanoparticles Using Biopolymers and Plant Extracts, in: S. Kanchiб, S. Ahmed (Eds.), Green Met. Nanoparticles, 2018: pp. 293–319. doi:10.1002/9781119418900.ch10.
- [2] A. Aygün, S. Özdemir, M. Gülcan, K. Cellat, F. Şen, Synthesis and characterization of Reishi mushroom-mediated green synthesis of silver

- nanoparticles for the biochemical applications, *J. Pharm. Biomed. Anal.* 178 (2020). doi:10.1016/j.jpba.2019.112970.
- [3] A.P. de Aragão, T.M. de Oliveira, P.V. Quelemes, M.L.G. Perfeito, M.C. Araújo, J. de A.S. Santiago, V.S. Cardoso, P. Quaresma, J.R. de Souza de Almeida Leite, D.A. da Silva, Green synthesis of silver nanoparticles using the seaweed *Gracilaria birdiae* and their antibacterial activity, *Arab. J. Chem.* 12 (2019) 4182–4188. doi:10.1016/j.arabjc.2016.04.014.
- [4] M. Khatami, I. Sharifi, M.A.L. Nobre, N. Zafarnia, M.R. Aflatoonian, Waste-grass-mediated green synthesis of silver nanoparticles and evaluation of their anticancer, antifungal and antibacterial activity, *Green Chem. Lett. Rev.* 11 (2018) 125–134. doi:10.1080/17518253.2018.1444797.
- [5] J. Saha, A. Begum, A. Mukherjee, S. Kumar, A novel green synthesis of silver nanoparticles and their catalytic action in reduction of Methylene Blue dye, *Sustain. Environ. Res.* 27 (2017) 245–250. doi:10.1016/j.serj.2017.04.003.
- [6] A. Nouri, M. Tavakkoli Yarak, A. Lajevardi, Z. Rezaei, M. Ghorbanpour, M. Tanzifi, Ultrasonic-assisted green synthesis of silver nanoparticles using *Mentha aquatica* leaf extract for enhanced antibacterial properties and catalytic activity, *Colloids Interface Sci. Commun.* 35 (2020) 100252. doi:10.1016/j.colcom.2020.100252.
- [7] V. Ravichandran, S. Vasanthi, S. Shalini, S.A.A. Shah, M. Tripathy, N. Paliwal, Green synthesis, characterization, antibacterial, antioxidant and photocatalytic activity of *Parkia speciosa* leaves extract mediated silver nanoparticles, *Results Phys.* 15 (2019) 102565. doi:10.1016/j.rinp.2019.102565.
- [8] M.A. Odeniyi, V.C. Okumah, B.C. Adebayo-Tayo, O.A. Odeniyi, Green synthesis and cream formulations of silver nanoparticles of *Nauclea latifolia* (African peach) fruit extracts and evaluation of antimicrobial and antioxidant activities, *Sustain. Chem. Pharm.* 15 (2020) 100197. doi:10.1016/j.scp.2019.100197.
- [9] Z. Molnár, V. Bódai, G. Szakacs, B. Erdélyi, Z. Fogarassy, G. Sáfrán, T. Varga, Z. Kónya, E. Tóth-Szeles, R. Szucs, I. Lagzi, Green synthesis of gold nanoparticles by thermophilic filamentous fungi, *Sci. Rep.* 8 (2018) 1–12. doi:10.1038/s41598-018-22112-3.
- [10] Z. Izadiyan, K. Shameli, M. Miyake, S.Y. Teow, S.C. Peh, S.E. Mohamad,

- S.H. Mohd Taib, Green fabrication of biologically active magnetic core-shell Fe₃O₄/Au nanoparticles and their potential anticancer effect, *Mater. Sci. Eng. C*. 96 (2019) 51–57. doi:10.1016/j.msec.2018.11.008.
- [11] M. Manikandakrishnan, S. Palanisamy, M. Vinosha, B. Kalanjiraja, S. Mohandoss, R. Manikandan, M. Tabarsa, S.G. You, N.M. Prabhu, Facile green route synthesis of gold nanoparticles using *Caulerpa racemosa* for biomedical applications, *J. Drug Deliv. Sci. Technol.* 54 (2019) 101345. doi:10.1016/j.jddst.2019.101345.
- [12] H. Shabestarian, M. Homayouni-Tabrizi, M. Soltani, F. Namvar, S. Azizi, R. Mohamad, H. Shabestarian, Green synthesis of gold nanoparticles using sumac aqueous extract and their antioxidant activity, *Mater. Res.* 20 (2017) 264–270. doi:10.1590/1980-5373-MR-2015-0694.
- [13] P.V. Kumar, S.M. Jelastin Kala, K.S. Prakash, Green synthesis derived Pt-nanoparticles using *Xanthium strumarium* leaf extract and their biological studies, *J. Environ. Chem. Eng.* 7 (2019) 103146. doi:10.1016/j.jece.2019.103146.
- [14] R. Dobrucka, Biofabrication of platinum nanoparticles using *Fumariae herba* extract and their catalytic properties, *Saudi J. Biol. Sci.* 26 (2019) 31–37. doi:10.1016/j.sjbs.2016.11.012.
- [15] N.S. Al-Radadi, Green synthesis of platinum nanoparticles using Saudi's Dates extract and their usage on the cancer cell treatment, *Arab. J. Chem.* 12 (2019) 330–349. doi:10.1016/j.arabjc.2018.05.008.
- [16] Z. Han, L. Dong, J. Zhang, T. Cui, S. Chen, G. Ma, X. Guo, L. Wang, Green synthesis of palladium nanoparticles using lentinan for catalytic activity and biological applications, *RSC Adv.* 9 (2019) 38265–38270. doi:10.1039/c9ra08051a.
- [17] A. Celebioglu, F. Topuz, T. Uyar, Facile and green synthesis of palladium nanoparticles loaded into cyclodextrin nanofibers and their catalytic application in nitroarene hydrogenation, *New J. Chem.* 43 (2019) 3146–3152. doi:10.1039/c8nj05133j.
- [18] S. Amrutham, V. Maragoni, V. Guttena, One-step green synthesis of palladium nanoparticles using neem gum (*Azadirachta Indica*): characterization, reduction of Rhodamine 6G dye and free radical scavenging activity, *Appl. Nanosci.* (2020). doi:10.1007/s13204-020-01352-8.