

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 66.061.34:66.047:615.322

Визначення раціональних умов використання мікрохвильового нагріву в процесах екстрагування біологічно активних речовин: комплексний огляд

К. О. Фатєєва

Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

✉ e-mail: kapauzka@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0781-0034>

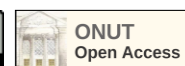
Розглядається процес допоміжної мікрохвильової екстракції, суть якої полягає у використанні мікрохвильового електромагнітного поля як інтенсифікуючого чинника для прискорення виділення біологічно активних речовин (БАР) із сировини. Встановлено, що продуктивність допоміжної мікрохвильової екстракції залежить від якості налаштування обладнання та процедури екстракції з оптимізованими робочими параметрами, та даний метод може бути неперевершеним з точки зору ефективності, стабільності та відтворюваності техніки. Визначені оперативні параметри, що впливають на ефективність використання енергії мікрохвильового поля, які включають співвідношення розчинника до сировини, склад розчинника, характеристики зразка рослини, потужність мікрохвиль, час опромінення, ефект перемішування, цільність мікрохвильової енергії та температуру екстракції. Отримано за результатами аналізу наукових праць, що ефективність зростає зі збільшенням температури, доки не буде досягнуто оптимального значення, та рекомендовано використовувати температурний діапазон від 40 до 80°C, а для максимізації виходу БАР при мінімізації деградації придатний час екстракції складає 5-15 хвилин. Встановлено, що навіть для найкраще оптимізованого процесу мікрохвильового нагрівання загальна енергоефективність може становити лише близько 80 %. Приділено особливу увагу визначенню глибини проникнення енергії мікрохвильового поля для різних видів екстрагентів та запропоновані умови мікрохвильового нагрівання рослинного матеріалу, що оброблюється. Наголошується, що рівномірність нагрівання зразка по товщині шару знижується тим більше, чим краще речовина здатна перетворювати мікрохвильову енергію в теплову, тому при використанні розчинників з високими коефіцієнтами діелектричних втрат їх недоцільно використовувати на стадії екстрагування в мікрохвильовому полі.

Ключові слова: Енергія мікрохвильового поля; Діелектричні втрати; Температура; Глибина проникнення; Рівномірність нагрівання.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v62i1.3496>

© The Author(s) 2026. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

Пошук сучасних, ефективних методів отримання біоактивних речовин (БАР) представляє безсумнівний як теоретичний, так і практичний інтерес. Основні проблеми, що виникають при вилученні біоактивних речовин з рослинного матеріалу, полягають у наступному: процес екстрагування за-

звичай є тривалим, що змушує шукати методи, що інтенсифікують вихід речовин; вилучення БАР може супроводжуватися їх розкладанням під впливом екстрагентів, температури, умов ведення процесу. Удосконалення технології екстрагування рослинної сировини з метою підвищення виходу БАР, якості та розширення асортименту є необхідною ланкою розвитку науково-технічних під-

ходів до інтенсифікації процесів перенесення. Мікрохвильове нагрівання здатне відігравати ключову роль у сучасних процесах екстракції біологічно активних речовин, оскільки істотно інтенсифікує масо- і теплоперенесення та скорочує тривалість процесу. Мікрохвильове поле нагріває матеріал по всьому об'єму, а не лише з поверхні, що дозволяє створити умови для швидкого й рівномірного підвищення температури екстракційної системи. Крім того, доведена можливість роботи при нижчих температурах, що важливо для термолабільних БАР. В той же час мікрохвильовий метод має обмеження та недоліки: ризики локального перегріву та деградації чутливих сполук; необхідність точного контролю потужності та часу опромінення; обмеження у масштабуванні для промислових процесів. Мікрохвильове поле в екстракторі розподіляється неоднорідно, що призводить до так званих «гарячих» і «холодних» зон у зразку. Причини виникнення таких явищ полягають в інтерференції електромагнітних хвиль та різних діелектричних властивостях компонентів сировини та розчинника. Внаслідок браку комплексних досліджень процесу екстрагування при використанні енергії мікрохвильового поля цей метод досі не впроваджений для промислового використання. Метою роботи є визначення сучасного стану розвитку методу екстрагування з використанням енергії мікрохвильового поля та оцінка впливу визначальних факторів (потужність мікрохвильового поля, температура, тривалість, діелектричні властивості) на ефективність мікрохвильового нагрівання.

2. Аналіз сучасного стану використання енергії мікрохвильового поля в процесі вилучення БАР

2.1. Механізм екстракції в умовах дії мікрохвильового поля

Для ефективної побудови інноваційних методів ведення процесу вилучення речовин слід точно уявляти, що є метою екстрагування. У ряді літературних джерел використовують поняття цільового компонента – ЦК [1, 2]. При вилученні одного компонента, наприклад, олії, таке поняття цілком застосовне. Однак при екстракції біологічно активних речовин з рослинних матеріалів не можна говорити про одиничний цільовий компонент (індивідуальну речовину). В екстрагент виноситься комплекс речовин, які, наприклад, у фармакології становлять основу галенових препаратів. Вилучен-

ня, що містить комплекс речовин, часто діє дещо інакше, ніж окрема виділена з нього хімічно чиста речовина [3, 4]. Вони є комплексом речовин, дію яких неможливо визначити математичними моделями – для оцінки їх ефективності необхідні випробування екстрактів у польових і лабораторних умовах. У огляді [5] підсумовані дослідження, проведені протягом останнього десятиліття щодо допоміжної мікрохвильової екстракції (ДМЕ) активних інгредієнтів з рослин. Проведено кілька досліджень щодо оптимізації факторів ДМЕ для досягнення оптимального виходу з розглянутих зразків рослин. Мікрохвильовий режим використовує дію електромагнітних полів для ефективного відділення певних органічних компонентів твердих або напівтвердих речовин від матриці, зберігаючи при цьому початковий складний стан аналізованого об'єкта [6]. На даний час розроблено обладнання для проведення мікрохвильової екстракції, одна з схем його наведена на рис. 1.

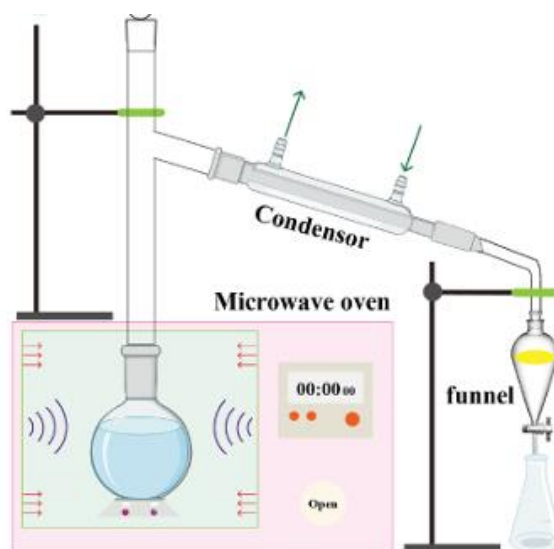


Рисунок 1 – Пристрій для мікрохвильової екстракції біологічно активних речовин [6]

Шляхом подальшої фільтрації та розділення отримують бажаний екстракт. Механізм мікрохвильової екстракції можна проілюструвати з таких аспектів:

– через кореляцію між частотою мікрохвиль та обертанням молекул; це енергія неіонізуючого випромінювання, спричинена міграцією іонів та дипольним обертанням молекулярного руху. Якщо молекули мають певну полярність, що означає, що вони можуть миттєво поляризуватися мікрохвильовим полем, це змушує їх рухатися зі зміщенням зі швидкістю 2,45 НГц. Це швидко генерує велику

кількість теплової енергії через коливання зв'язків молекул, тертя та зіткнення міжчастинки, що може призвести до розриву комірки та витoku внутрішньої рідини та дифузії в розчинник [7].

– під час мікрохвильової екстракції різниця у здатності поглинати мікрохвилі може призвести до вибіркового нагрівання певних ділянок матричного матеріалу або окремих компонентів [8]. В результаті це дозволяє відокремити екстраговану речовину від матриці або системи в екстракційному розчиннику, що має меншу діелектричну проникність та відносно низьку здатність до поглинання мікрохвиль.

Процес взаємодії мікрохвильового випромінювання з матеріалом полягає в тому, що високочастотні електромагнітні хвилі проникають через екстракційне середовище, щоб досягти сировини всередині пучків мікротрубочок та системи клітин. Через поглинання мікрохвильової енергії температура всередині клітини швидко підвищується, так що її внутрішній тиск перевищує розширення стінки, яке вона може витримати [9]. В результаті клітини розриваються, і активні інгредієнти в них вільно витікають, розчиняючись в екстракційному середовищі при нижчій температурі.

Мікрохвильове електромагнітне поле, що генерується, може прискорити швидкість дифузії молекул екстрагованих компонентів з твердої внутрішньої частини до межі тверда речовина-рідина. Наприклад, під дією мікрохвильового поля молекули розчинника води з високошвидкісного обертання переходять у збуджений стан, що є високоенергетично нестабільним станом. У цей час молекули води або випаровуються, посилюючи рушійну силу екстрагованих компонентів, або вивільняють свою надлишкову енергію назад у базовий стан. Енергія передається молекулам інших речовин для прискорення їхнього теплового руху, тим самим скорочуючи час екстракції. В результаті швидкість екстракції збільшується в кілька разів, тоді як температура знижується, щоб максимізувати якість екстрагованого матеріалу.

Ефективність мікрохвильового нагрівання залежить від коефіцієнта діелектричних втрат матеріалу ε'' , тангенсу кута діелектричних втрат $\tan\delta$, який вимірює здатність зразка поглинати мікрохвильову енергію та розсіювати тепло навколишнім молекулам, механізм чого обговорюється в [10, 11]. Залежність, що зв'язує питому потужність q_v , що виділяється у вигляді теплоти в діелектричному матеріалі при поміщенні його в мікрохвильове

поле, з діелектричними характеристиками матеріалу, частотою коливань електромагнітного поля та напруженістю електричного поля, згідно з законом Джоуля-Ленца, представляється у такому вигляді [12]:

$$q_v = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot \tan\delta \cdot E^2 \quad (1)$$

де f – частота коливань електромагнітного поля; E – напруженість електричного поля.

У [13] було виявлено, що співвідношення глибини/діаметра, що наближається до 1:1, забезпечує найбільш рівномірне нагрівання. Розподіл модуля напруженості електричного поля за товщиною матеріалу на частоті 2,45 ГГц має осцилюючий характер [14]. В той же час зазначається [15], що відмінності в характері перебігу екстракційних процесів, що спостерігаються при традиційному та мікрохвильовому нагріванні, не може бути пояснено виключно відмінностями характеру теплоподілення. Можлива зміна енергії активації самодифузії атомів при мікрохвильовому нагріванні [16], вплив орієнтаційної залежності коефіцієнта дифузії від поляризації в мікрохвильовому полі, зміна температури фазових перетворень у твердій фазі. Ефективність нагрівання речовини за рахунок іонної провідності практично не залежить від частоти мікрохвильового випромінювання, проте сильно залежить від температури, оскільки з її підвищенням рухливість іонів сильно зростає [17]. Ефективність та рівномірність нагріву також залежить від теплофізичних властивостей матеріалу, що визначає здатність передавати теплоту за об'ємом. Однією з причин нерівномірного нагріву зразків може бути істотна зміна значення фактора діелектричних втрат зі зростанням температури, яка може виражатися як в збільшенні, так і в зменшенні цієї величини. Отже, необхідно ретельно визначати умови обробки.

2.2. Основні фактори, що впливають на екстракцію в умовах дії мікрохвильового поля

Оперативні параметри, що впливають на ДМЕ, включають співвідношення розчинника до сировини, склад розчинника, характеристики зразка рослини та вміст води в ньому, потужність мікрохвиль, час опромінення, ефект перемішування, щільність мікрохвильової енергії та температуру. Ці оперативні параметри визначають ефективність ДМЕ. Отже, розуміння впливу та взаємодії цих параметрів на процес екстракції є надзвичайно важливим [6].

Вплив мікрохвильової потужності. Мікрохвильова потужність суттєво впливає на ефективність екстракції, і її діапазон використання зазвичай становить 200-1000 Вт [18]. Потужність мікрохвиль не повинна бути занадто великою; інакше можливо виникнення сильного кипіння екстрагованого розчину або локального перегріву, що призведе до руйнування компонентів, які є термічно нестабільними або чутливими до енергії випромінювання [19]. Однак, коли потужність мікрохвиль занадто мала, розчин нагрівається занадто повільно, що впливає на швидкість екстракції.

Потужність мікрохвильового випромінювання також пов'язана з кількістю зразка та необхідним часом екстракції. Потужність, яка забезпечує локалізоване нагрівання в рослинній матриці, діє як рушійна сила при ДМЕ, щоб руйнувати рослинну матрицю та щоб розчинена речовина могла дифундувати та розчинитися в розчиннику. Тому збільшення потужності мікрохвильового випромінювання, як правило, покращує вихід екстракції та призводить до скорочення часу екстракції [20]. Важливо вибрати відповідну потужність мікрохвиль, щоб скоротити час екстракції, необхідний для досягнення заданої температури, та уникнути феномену «стрибків» [21]. Підсумовуючи, слід вибрати відповідну потужність, щоб мінімізувати час, необхідний для досягнення встановленого рівня, та уникнути температурних «піків» під час процесу екстракції.

Вплив температури. Як правило, швидкість екстракції зростає зі зростанням температури. Підвищена температура прискорює рух молекул, що зменшує як в'язкість, так і поверхневий натяг розчинника, тим самим полегшуючи проникнення розчину в зразок [22]. Водночас підвищена температура також може посилити розрив капілярних стінок та клітин рослинних зразків, що сприяє екстракції. Однак занадто висока температура схильна до розкладання термочутливих активних речовин, таких як поліфеноли [23]. Крім того, високі температури можуть змінювати властивості деяких розчинників, тим самим знижуючи ефективність екстракції. Наголошується, що діапазон від 50 до 80 °C загалом вважається безпечним та ефективним для ДМЕ, причому оптимальні температури залежать від конкретного рослинного матеріалу та використовуваного розчинника. Підвищення температури може призвести до падіння поверхневого натягу та в'язкості, що посилює розчинність речовин, покращуючи змочування та прони-

кнення в матрицю. Однак автори [24] повідомили, що ефективність ДМЕ зростає зі збільшенням температури, доки не буде досягнуто оптимального значення. Температура впливає на швидкість дифузії, розчинність та кінетику деградації фенольних сполук у розчиннику. Зазвичай використовуються температури від 40 до 80°C, залежно від рослини матриці та термічної стабільності цільової сполуки, причому 80°C є хорошим першим вибором [25]. В обладнанні ДМЕ контроль температури часто інтегрований із системами моніторингу в режимі реального часу, щоб забезпечити рівномірне нагрівання та запобігти локальному перегріву або «гарячим точкам».

Час застосування. Час мікрохвильової екстракції пов'язаний з кількістю зразка, об'ємом розчинника та потужністю нагрівання. Різні поліфенольні компоненти мають різні форми існування та стабільності в клітині та демонструють різну реакцію на час мікрохвильової екстракції. Як правило, час екстракції для ДМЕ дуже короткий, і 10 хвилин достатньо. Автори [26] виявили, що швидкість екстракції дещо збільшилася протягом 3 хвилин, а потім зменшилася, що свідчить про незначне покращення. Крім того, оптимальний час екстракції для різних речовин є різним. Для сполук, чутливих до мікрохвильового випромінювання, час слід скоротити. Варто зазначити, що тривала дія мікрохвиль призводить до хімічних реакцій, таких як деградація та окислення поліфенольних речовин, що призводить до структурних змін, що знижують швидкість екстракції, тип та частку поліфенолів. Загалом, короткий час екстракції (5-15 хвилин) є корисним для максимізації виходу поліфенолів при мінімізації деградації.

Через швидке нагрівання та посилений масообмін, час екстракції в мікрохвильовому процесі значно короткий порівняно з традиційними методами. Оптимальний час екстракції зазвичай становить від 2 до 15 хвилин, причому 10 хвилин є хорошим першим вибором [27]. Коротші тривалості запобігають деградації термічно нестабільних сполук, тоді як довший час експозиції може збільшити вихід за рахунок стабільності. Кінетичні дослідження можна використовувати для визначення часу досягнення рівноваги екстракції.

Співвідношення матеріал/рідина. Співвідношення розчинника до сировини [28]. Вибір розчинника є найважливішим фактором, що впливає на мікрохвильову екстракцію. Занадто низькі співвідношення можуть призвести до насичення роз-

чинника та обмежити дифузію розчиненої речовини, тоді як занадто високі співвідношення можуть спричинити неефективне використання ресурсів. Частка зразка в екстракційному розчиннику не повинна перевищувати 30-34% (мас./об.). Типові оптимізовані співвідношення коливаються від 1:10 до 1:40 (г/мл), залежно від щільності матриці та вмісту фенолу. Співвідношення матеріал/рідина слід систематично змінювати, щоб визначити точку рівноваги, в якій подальше збільшення швидкості більше не покращує суттєво ефективність екстракції. У дослідженнях [29] повідомлялося, що співвідношення розчинника до сировини від 10:1 (мл/г) до 20:1 (мл/г) дає оптимальний вихід. Об'єм екстракційного розчинника є одним важливим фактором, великий об'єм розчинника вимагає більше енергії та часу для конденсації екстракційного розчину в процесі очищення.

Вибір розчинника. Адекватний забезпечить ефективний процес екстракції. Розчинність досліджуваної сполуки, кінетика масопереносу в процесі та проникнення розчинника, що відбувається внаслідок взаємодії між діелектричним ефектом та матрицею зразка, є неминучими параметрами [24]. Автори [30] повідомили, що вибір екстракційного розчинника залежить від здатності поглинати мікрохвильову енергію. Такі розчинники, як метанол, етанол та вода, є чудовими розчинниками, що поглинають мікрохвильове випромінювання, які мають достатню полярність для нагрівання в мікрохвильовому полі. Дослідження показали, що додавання невеликої кількості води до полярного розчинника призводить до більшої дифузії води в клітини матриці, що призводить до ефективного нагрівання та, таким чином, полегшує транспортування сполук у розчинник з вищими швидкостями масопереносу [31, 32]. Здебільшого, вилучення біоактивних сполук з рослинної матриці має тенденцію до збільшення завдяки її вологості, яка діє як розчинник. Ця волога нагрівається, випаровується, створює тиск у клітині та виділяє розчинені речовини через розрив клітинної стінки; таким чином, збільшується вихід біоактивних сполук [33].

Вплив перемішування. Вплив перемішування можна пов'язати з процесом масопереносу в розчиннику, що викликає конвенція. Отже, стабільність між парою та водною фазами може бути досягнута швидко. Процес, як правило, прискорюється завдяки перемішуванню, що покращує розчинення та десорбцію біоактивних компонентів у зразку рослини [34]. Використання низького спів-

відношення розчинника до сировини може зменшити бар'єр масопереносу від розчинених речовин у локалізованій області [35].

Підготовка зразків. Належна підготовка зразків є важливою для забезпечення відтворюваності та ефективності. Спочатку свіжі рослинні матеріали ретельно промивають дистильованою водою для видалення пилу, ґрунту та мікробних забруднень. Потім їх сушать у тіні при температурі 40-50 °C або ліофілізують тощо, залежно від чутливості фенольних сполук. Після сушіння зразки подрібнюють до дрібного порошку за допомогою млинки з нержавіючої сталі, зазвичай через сито з розміром отворів 60-80 меш, щоб забезпечити однорідний розмір частинок. Порошкоподібні зразки слід зберігати в герметичному, світлонепроникному контейнері при температурі 4 °C або у вакуумі, щоб запобігти окисленню та деградації перед екстракцією.

Фільтрація та вимірювання. Відразу після екстракції розчин охолоджують на крижаній бані, щоб зупинити термічну реакцію. Потім розчин фільтрують за допомогою фільтрувального паперу або центрифугування (зазвичай 4000-6000 об/хв протягом 10-15 хвилин) для видалення нерозчинних залишків. Фільтрат зберігають у бурштинових флаконах при температурі 4 °C або заморожують при температурі -20°C до аналізу.

Методи оцінки ефективності мікрохвильової екстракції. Для оцінки ефективності мікрохвильової екстракції використовуються три режими нагрівання [36]. До них належать режим нагрівання з постійною потужністю, режим періодичного нагрівання та режим нагрівання при постійній температурі. Режим нагрівання з постійною потужністю є стандартною практикою екстракції термочутливих активних компонентів рослинної матриці [37]. Варто зазначити, що сама по собі потужність мікрохвиль не дає адекватного пояснення того, як енергія поглинається під час екстракції біологічного середовища. Автори [38] досліджували взаємозв'язок між щільністю енергії мікрохвиль та виходом екстракції та дійшли висновку, що для одиниці екстрагуючого розчинника щільність енергії мікрохвиль є найважливішим фактором, що впливає на ефективність екстракції в мікрохвильовій екстракції

В [39] повідомили про прискорений вплив на іонну провідність та обертання диполя, що, у свою чергу, призводить до збільшення виходу екстракції. Це пов'язано з вивільненням більшої кількості

мікрохвильової енергії в біологічне середовище зі збільшенням потужності мікрохвиль. Швидкість поглинання полярних розчинників покращується зі збільшенням потужності, що зрештою призводить до вищої швидкості нагрівання та екстракції [40].

Ефективність використання МХ енергії викликає особливий інтерес, оскільки вона забезпечує важливий показник економічної ефективності. Добре розуміння цієї ефективності за допомогою кількісних вимірювань необхідне для оптимізації процесу мікрохвильового нагрівання та його більш ефективного використання. У дослідженні [41] процес мікрохвильового нагрівання розділено на два етапи (вхідна електрична енергія спочатку перетворюється на мікрохвильову енергію, а потім мікрохвильова енергія у вигляді електромагнітних хвиль поглинається діелектричним середовищем і перетворюється на ефективне тепло), детально розраховано ефективність використання енергії та вивчено вплив різних факторів. Було виявлено, що положення матеріалу в мікрохвильовій порожнині, тип нагрівального середовища, вихідна потужність мікрохвиль та геометричні параметри нагрівального середовища, такі як об'єм, можуть суттєво впливати на енергоефективність. Але навіть для найкраще оптимізованого процесу мікрохвильового нагрівання загальна енергоефективність може становити лише близько 80 %.

Перспективи на майбутнє. ДМЕ пропонує значні переваги порівняно з традиційними методами, включаючи коротший час, меншу витрату розчинника, вищі швидкості екстракції та покращене збереження біологічної активності. Наголошується, що оптимізація процесу екстракції, від підготовки зразків до аналізу даних, має вирішальне значення для реалізації повного потенціалу ДМЕ. По суті, спочатку слід дослідити вплив таких параметрів, як потужність мікрохвильової печі, час обробки, тип розчинника та співвідношення сировина – розчинник на ефект екстракції, а потім створити точнішу модель процесу для підвищення ефективності екстракції та якості продукту за допомогою методів оптимізації, таких як методологія поверхні відгуку та штучні нейронні мережі. Хоча багато досліджень продемонстрували переваги ДМЕ з точки зору виходу та антиоксидантної здатності, варіації у складі матриці, поліфенольних компонентах, а також масштабі процесу створюють проблеми для стандартизації та промислового застосування. Крім того, більшість застосувань ДМЕ

все ще знаходяться в лабораторному масштабі. Тому більше досліджень має бути зосереджено на масштабуванні процесу, аналізі енергетичних показників, оновленні обладнання та техніко-економічних дослідженнях доцільності для підтримки промислового впровадження.

3. Оцінка глибини проникнення мікрохвильового електромагнітного поля в розчинники

Важливою фізичною величиною, що характеризує здатність речовини поглинати мікрохвильову енергію, є глибина проникнення, тобто відстань від поверхні матеріалу, на якому енергія електромагнітного поля зменшується в e раз (приблизно до 37% значення на поверхні). Знаючи глибину проникнення енергії мікрохвильового поля у матеріал, можна підібрати параметри, що запобігають перегріву поверхні та забезпечують рівномірне нагрівання всередині. Якщо глибина мала, можливі термічна напруга, тріщини, нерівномірні властивості матеріалу. При екстрагуванні БАР важливо не пошкодити глибинним перегрівом. Також для оцінки енергоефективності процесу потрібні знання глибини проникнення, що дозволяє зрозуміти, яка частина енергії реально поглинається матеріалом, а яка відбивається чи проходить наскрізь.

В таблиці 1 наведені результати розрахунку глибини проникнення мікрохвильового поля частотою 2,45 ГГц при кімнатній температурі для ряду розчинників, що використовуються в ДМЕ. Діелектрична постійна – ϵ' ; тангенс кута втрат – $\tan\delta$; діелектричні втрати – ϵ'' ; коефіцієнт ослаблення – α ; глибина проникнення – Δ .

Глибина проникнення визначається залежністю [42]:

$$\Delta = \frac{1}{2\alpha} \quad (2)$$

де α – коефіцієнт ослаблення [42], m^{-1} :

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[\frac{1}{2} \epsilon' \left[\sqrt{1 + tg\delta^2} - 1 \right] \right]^{0.5}$$

Довжина хвилі мікрохвильового випромінювання з частотою 2,45 ГГц λ_0 у вакуумі становить приблизно $12,24 \cdot 10^{-2}$ м.

Таблиця 1 – Діелектричні характеристики [43] та глибина проникнення для деяких розчинників, що зазвичай використовуються в ДМЕ.

Розчинник	ϵ'	$\tan\delta$	ϵ''	α	Δ , м
Вода	80,4	0,13	12,3	29,84	0,017
Етиловий спирт	6,0	1,1	6,6	61,9	0,008
ДМСО	45,0	0,825	37,125	132,5	0,004
ДМФ	37,7	0,161	6,079	25,3	0,02
Етиленглицоль	37,7	1,32	49,950	180	0,003
Метанол	32,6	0,659	21,48	92,1	0,005
Етанол	24,3	0,941	22,87	139,8	0,004
2-Пропанол	19,9	0,67	13,3	73,0	0,007
Толуол	2,4	0,040	0,096	0,16	1,56
Гексан	1,9	0,020	0,038	0,707	0,707
ДМСО – диметилсульфоксид					
ДМФ – диметилформамид					

Аналізуючі дані табл.1, можна зробити висновок, що такі розчинники як толуол та гексан практично радіопрозорі та вони в методі ДМЕ можуть знайти використання, коли нагрівання матеріалу в мікрохвильовому полі та екстракція цільових компонентів в розчинник відбувається одночасно. Цей метод має переваги, оскільки енергія МХ поля поглинається самим матеріалом, а не витрачається на нагрівання розчинника, що підвищує енергоефективність та тривалість процесу. Гексан вибирають, оскільки він добре розчиняє жири і легко видаляється після екстракції Гексан показав свою ефективність при екстракції восків та ліпофільних компонентів з насіння, листя та водоростей. Толуол менш леткий і більш полярний, ніж гексан, тому здатний розчиняти складніші структури. Він застосовується для отримання ароматичних і високомолекулярних сполук та деяких компонентів деревини.

Для отримання БАР для харчової та аграрної промисловості зазвичай використовують воду. Проте глибина проникнення для води складає $\Delta = 0,017$ м, тобто при одночасному нагріванні розчинника та рослинного матеріалу, по-перше, більша частка енергії буде витрачатися на нагрівання води як розчинника, по-друге – рівномірність нагрівання складно досягти, оскільки мікрохвильова енергія швидко згасає за глибиною. Рекомендується дотримуватися прийнятої норми: товщина шару, що обробляється в МХ полі, не повинна перевищувати подвійної товщини проникнення. Тобто товщина активної зони при використанні води не повинна перевищувати $2\Delta = 0,034$ м. Наступний широко використовуваний розчинник –

етиловий спирт. Це один із найуніверсальніших екстрагентів, тому що він змішується з водою і добре розчиняє широкий спектр біологічно активних речовин, внаслідок чого його використовують у фармації, фітохімії та харчових технологіях. Як і вода, як можна бачити з табл. 1, він інтенсивно поглинає мікрохвильову енергію – глибина проникнення складає $\Delta = 0,008$ м, тому одночасне нагрівання матеріалу з розчинником в МХ полі нераціональна.

З аналізу процесу перетворення енергії мікрохвиль в теплоту впливає важливий висновок: чим краще речовина здатна перетворювати електромагнітну енергію, тим менша рівномірність нагрівання зразка по товщині шару.

4. Висновки

Допоміжна мікрохвильова екстракція пропонує значні переваги порівняно з традиційними методами, включаючи коротший час, меншу витрату розчинника, вищі швидкості екстракції та покращене збереження біологічної активності. Проте більшість застосувань ДМЕ все ще знаходяться в лабораторному масштабі.

Для ефективного вилучення БАР у промислових об'ємах необхідна розробка мікрохвильового екстрактора безперервної дії, виконання каналу з урахуванням діелектричних характеристик розчинника з рослинним матеріалом при врахуванні даних з інтенсифікації переносу, отриманих на основі планованих аналітичних та експериментальних досліджень.

Ефективність використання енергії мікрохви-

льового поля суттєво залежить від вибору розчинника. Для розчинників з високими значеннями фактору діелектричних втрат ϵ'' мікрохвильова енергія витрачається на нагрів в більшій мірі розчинника, а не сировини. Внаслідок цього раціонально процес екстракції розділити на дві стадії: перша – мікрохвильова обробка рослинної сировини, друга – саме екстрагування БАР з обробленої сировини в розчинник.

Рівномірність нагрівання зразка по товщині шару знижується тим більш, чим краще речовина здатна перетворювати електромагнітну енергію. При виготовленні робочої ділянки слід враховувати значення глибини проникнення МХ поля, яке визначається здатністю розчинника перетворювати енергію мікрохвильового поля в теплову.

Література

1. **Chorny, V., Mysiura, T., Popova, N., Zavialov, V.** Solvent Selection For Extraction Of Target Components From Amber // *Journal of Chemistry and Technologies*. – 2021. – Vol. 29(1). – P. 92-99. DOI: <https://doi.org/10.15421/082106>
2. **Є.М Семенишин О. С. Іващук Т. І. Римар.** Дослідження кінетики екстрагування олії з рослинної сировини обмеженими розчинниками // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, серія «Хімія, технологія речовин та їх застосування». – 2018. – № 886. – С. 177-183.
3. **T. P. Vo et al.** Recovering bioactive compounds from yacon (*Smallanthus sonchifolius*) using the ultrasonic-microwave-assisted extraction technique // *Applied Food Research*. – 2024. – P. 100451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100451>.
4. **H.-K. Biesalski et al.** Bioactive compounds: Definition and assessment of activity // *Nutrition*. 2009. Vol. 25, no. 11-12. P. 1202–1205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nut.2009.04.023>.
5. **C.-H. Chan et al.** Microwave-assisted extractions of active ingredients from plants // *Journal of Chromatography A*. 2011. Vol. 1218, no. 37. P. 6213–6225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.07.040>.
6. **P. Zou et al.** Guidelines for the Extraction of Plant Polyphenols Using Microwave-Assisted Techniques // *Food Chemistry International*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/fci2.70022>.
7. **Sridhar, A., M. Ponnuchamy, P. S. Kumar, A. Kapoor, D.-V. N. Vo, and S. Prabhakar.** Techniques and Modeling of Polyphenol Extraction From Food: A Review // *Environmental Chemistry Letters*. – 2021. – Vol. 19, no. 4. – P. 3409–3443. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01217-8>.
8. **E. Gil-Martín et al.** Influence of the extraction method on the recovery of bioactive phenolic compounds from food industry by-products // *Food Chemistry*. – 2022. – Vol. 378. – P. 131918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131918>
9. **Y. Ozogul et al.** Tannins for Food Preservation and Human Health: A Review of Current Knowledge // *Applied Food Research*. – 2025. – P. 100738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100738>.
10. **C. Liu et al.** Dielectric Properties and Microwave Heating Characteristics of Sodium Chloride at 2.45 GHz // *High Temperature Materials and Processes*. – 2013. – Vol. 32, no. 6. – P. 587–596. DOI: <https://doi.org/10.1515/htmp-2013-0008>
11. **W. Wang et al.** Quantitative measurement of energy utilization efficiency and study of influence factors in typical microwave heating process // *Energy*. – 2015. – Vol. 87. – P. 678–685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.036>.
12. **Jiménez-Amezcuca et al.** Simultaneous microwave-assisted extraction of bioactive compounds from aged garlic // *Journal of Chromatography A*. – 2023. – P. 464128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2023.464128>.
13. **Y. Asakuma et al.** Influence of the Shape Factor on the Heating of an Aqueous Solution by Microwave // *Microwave*. – 2025. – Vol. 1, no. 3. – P. 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/microwave1030010>.
14. **L. Sillero et al.** Sustainable recovery of bioactive compounds from forest residues using microwave-assisted extraction // *Separation and Purification Technology*. – 2025. – P. 134993. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134993>.
15. **Mandal, V., Mohan, Y. and Hemalatha, S.** Microwave assisted extraction – an innovative and promising extraction tool for medicinal plant research // *Pharmacognosy reviews*. – 2007. – Vol. 1(1). – P. 7-18.
16. **Y. Nikhita et al.** Microwave assisted extraction of bioactive compounds: A brief review // *Journal of Indian Chemical Society*. – 2020. – Vol. 97, No. 10a. – P. 1751-1756. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5957288>.
17. **A. Valdés et al.** Microwave-Assisted Extraction of Phenolic Compounds from Almond Skin Byproducts (*Prunus amygdalus*): A Multivariate Analysis Approach // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. – 2015. – Vol. 63, no. 22. – P. 5395–5402. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b01011>.
18. **Alara O. R., Abdurahman N. H., Ali H. A.** Op-

- timization of microwave-enhanced extraction parameters to recover phenolic compounds and antioxidants from *Corchorus olitorius* leaves // *Chemical Papers*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02771-x>.
19. **Y. Zhang et al.** Comprehensive analysis of phenolic profile, their antioxidant activities, and physico-chemical characteristics of rapeseed oil under various microwave and storage conditions // *Food Chemistry: X*. – 2025. – Vol. 29. – P. 102637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102637>.
20. **B. G. Terigar et al.** Continuous microwave-assisted isoflavone extraction system: Design and performance evaluation // *Bioresource Technology*. – 2010. – Vol. 101, no. 7. – P. 2466–2471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.039>.
21. **Sparr Eskilsson C., Björklund E.** Analytical-scale microwave-assisted extraction // *Journal of Chromatography A*. – 2000. – Vol. 902, no. 1. – P. 227–250. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)00921-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)00921-3).
22. **T. P. Vo et al.** Combining novel extraction techniques with natural deep eutectic solvent to acquire phenolic and terpenoid compounds from *Paris polyphylla* roots // *Journal of Agriculture and Food Research*. – 2024. – Vol. 18. – P. 101544. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101544>.
23. **I. T. Tomasi et al.** Optimization of microwave-assisted extraction of phenolic compounds from chestnut processing waste using response surface methodology // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – P. 136452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136452>.
24. **Spigno G., De Faveri D. M.** Microwave-assisted extraction of tea phenols: A phenomenological study. *Journal of Food Engineering*. – 2009. – Vol. 93, no. 2. – P. 210-217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.01.006>.
25. **Flórez N., Conde E., Domínguez H.** Microwave assisted water extraction of plant compounds // *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. – 2014. – Vol. 90, no. 4. – P. 590-607. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.4519>.
26. **T. P. Vo et al.** Optimizing Ultrasonic-Assisted and Microwave-Assisted Extraction Processes to Recover Phenolics and Flavonoids from Passion Fruit Peels // *ACS Omega*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04550>.
27. **M. C. Di Meo et al.** Microwave-Assisted Extraction of Olive Leaf from Five Italian Cultivars: Effects of Harvest-Time and Extraction Conditions on Phenolic Compounds and In Vitro Antioxidant Properties // *ACS Food Science & Technology*. – 2021. – Vol. 2, no. 1. – P. 31-40. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsfodscitech.1c00227>.
28. **P. Rodríguez Seoane et al.** Microwave-Assisted Water Extraction // *Water Extraction of Bioactive Compounds*. – 2017. – P. 163-198. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809380-1.00006-1>.
29. **Pan X., Niu G., Liu H.** Microwave-assisted extraction of tea polyphenols and tea caffeine from green tea leaves // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. – 2003. – Vol. 42, no. 2. – P. 129–133. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(02\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(02)00037-5).
30. **C.-H. Chan et al.** Microwave-assisted extractions of active ingredients from plants // *Journal of Chromatography A*. – 2011. – Vol. 1218, no. 37. – P. 6213–6225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.07.040>.
31. **L. Chen et al.** Application of on-line microwave sample-preparation techniques // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. – 2008. – Vol. 27, no. 2. – P. 151-159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2008.01.003>.
32. **C.-H. Chan et al.** A generalized energy-based kinetic model for microwave-assisted extraction of bioactive compounds from plants // *Separation and Purification Technology*. – 2015. – Vol. 143. – P. 152–160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.01.041>.
33. **Wang L., Weller C. L.** Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants // *Trends in Food Science & Technology*. – 2006. – Vol. 17, no. 6. – P. 300–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.12.004>.
34. **Ruan G.-H., Li G.-K.** The study on the chromatographic fingerprint of *Fructus xanthii* by microwave assisted extraction coupled with GC–MS // *Journal of Chromatography B*. – 2007. – Vol. 850, no. 1-2. – P. 241–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2006.11.036>.
35. **Y. Nkhita et al.** Microwave assisted extraction of bioactive compounds: A brief review // *Journal of Indian Chemical Society*. – 2020. – Vol. 97, No. 10a, – P. 1751–1756. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5957288>.
36. **C.-H. Chan et al.** A generalized energy-based kinetic model for microwave-assisted extraction of bioactive compounds from plants // *Separation and Purification Technology*. – 2015. – Vol. 143. – P. 152-160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.01.041>.
37. **B. G. Terigar et al.** Continuous microwave-assisted isoflavone extraction system: Design and performance evaluation // *Bioresource Technology*. – 2010.

- Vol. 101, no. 7. – P. 2466–2471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.039>.
38. **Y. Li et al.** Effect of energy density and citric acid concentration on anthocyanins yield and solution temperature of grape peel in microwave-assisted extraction process // *Journal of Food Engineering*. – 2012. – Vol. 109, no. 2. – P. 274–280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.021>.
39. **Gao M., Song B.-Z., Liu C.-Z.** Dynamic microwave-assisted extraction of flavonoids from *Saussurea medusa* Maxim cultured cells // *Biochemical Engineering Journal*. – 2006. – Vol. 32, no. 2. – P. 79–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.09.004>.
40. **Desai M., Parikh J., Parikh P. A.** Extraction of Natural Products Using Microwaves as a Heat Source // *Separation & Purification Reviews*. – 2010. – Vol. 39, no. 1-2. – P. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.1080/15422111003662320>
41. **W. Wang et al.** Quantitative measurement of energy utilization efficiency and study of influence factors in typical microwave heating process // *Energy*. – 2015. – Vol. 87. – P. 678–685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.036>.
42. **Yang X. H., Tang J.** *Advances In Bioprocessing Engineering*. – WORLD SCIENTIFIC, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1142/4763>.
43. **Sparr Eskilsson C., Björklund E.** Analytical-scale microwave-assisted extraction // *Journal of Chromatography A*. – 2000. – Vol. 902, no. 1. – P. 227–250. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)00921-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)00921-3).

Отримана в редакції 07.02.2026, прийнята до друку 03.03.2026

Determination of rational conditions for the use of microwave heating in the extraction processes of biologically active substances: a comprehensive review

Kristina Fateeva

Odesa National University of Technology, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: kapauzka@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0781-0034>

The process of microwave-assisted extraction is considered, the essence of which lies in the use of a microwave electromagnetic field as an intensifying factor to accelerate the release of biologically active substances from raw materials. It has been established that the efficiency of microwave-assisted extraction depends on the quality of equipment setup and the extraction procedure with optimized operating parameters, and that this method can be unrivaled in terms of efficiency, stability, and reproducibility of the technique. The operational parameters affecting the efficiency of microwave field energy utilization have been identified, including the solvent-to-solid ratio, solvent composition, plant sample characteristics, microwave power, irradiation time, stirring effect, microwave energy density, and extraction temperature. Based on the analysis of scientific literature, it was found that extraction efficiency increases with temperature until an optimal value is reached; therefore, a temperature range of 40–80 °C is recommended, while an extraction time of 5–15 minutes is considered optimal for maximizing the yield of biologically active substances while minimizing their degradation. It has been established that even for the most optimally designed microwave heating process, the overall energy efficiency may reach only about 80 %. Special attention is paid to determining the penetration depth of microwave field energy for various types of extractants, and conditions for microwave heating of the processed plant material are proposed. It is emphasized that the uniformity of sample heating across the layer thickness decreases as the ability of a substance to convert microwave energy into thermal energy increases; therefore, solvents with high dielectric loss factors are not advisable for use at the extraction stage in a microwave field.

Keywords: Microwave field energy; Dielectric losses; Temperature; Penetration depth; Heating uniformity.

References

1. **Chorny, V., Mysiura, T., Popova, N., Zavialov, V.** (2021). Solvent Selection For Extraction Of Target Components From Amber. *Journal of Chemistry and Technologies*, 29(1), 92–99.
2. **Semenyshyn, E.M., Ivashchuk, O. S., Rymar, T. I.** (2018). Research on the kinetics of oil extraction from plant raw materials with organic solvents. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*, se-

- ries "Chemistry, Technology of Substances and Their Applications", 886, 177-183.
3. **Vo, T. P., Ho, T. A. T., Ha, N. M. H., Nguyen, M. T., Chung, M. M., Nguyen, H. N., Nguyen, D. Q.** (2024). Recovering bioactive compounds from yacon (*Smallanthus sonchifolius*) using the ultrasonic-microwave-assisted extraction technique. *Applied Food Research*, 100451.
 4. **Biesalski, H.-K., Dragsted, L. O., Elmadfa, I., Grossklaus, R., Müller, M., Schrenk, D., Walter, P., Weber, P.** (2009). Bioactive compounds: Definition and assessment of activity. *Nutrition*, 25(11-12), 1202–1205.
 5. **Chan, C.-H., Yusoff, R., Ngoh, G.-C., Kung, F. W.-L.** (2011). Microwave-assisted extractions of active ingredients from plants. *Journal of Chromatography A*, 1218(37), 6213–6225.
 6. **Sridhar, A., Ponnuchamy, M., Kumar, P. S., Kapoor, A., Vo, D.-V. N., & Prabhakar, S.** (2021). Techniques and modeling of polyphenol extraction from food: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 3409–3443.
 7. **Gil-Martín, E., Forbes-Hernández, T., Romero, A., Cianciosi, D., Giampieri, F., & Battino, M.** (2022). Influence of the extraction method on the recovery of bioactive phenolic compounds from food industry by-products. *Food Chemistry*, 378, 131918.
 8. **Ozogul, Y., Ucar, Y., Tadesse, E. E., Rathod, N., Kulawik, P., Trif, M., Esatbeyoglu, T., & Ozogul, F.** (2025). Tannins for Food Preservation and Human Health: A Review of Current Knowledge. *Applied Food Research*, 100738.
 9. **Liu, C., Zhang, L., Peng, J., Qu, W., Liu, B., Xia, H., & Zhou, J.** (2013). Dielectric Properties and Microwave Heating Characteristics of Sodium Chloride at 2.45 GHz. *High Temperature Materials and Processes*, 32(6), 587–596.
 10. **Wang, W., Zhao, C., Sun, J., Wang, X., Zhao, X., Mao, Y., Li, X., & Song, Z.** (2015). Quantitative measurement of energy utilization efficiency and study of influence factors in typical microwave heating process. *Energy*, 87, 678–685.
 11. **Jiménez-Amezcuca, González-Prada, A., Díez-Municio, M., Soria, A. C., Ruiz-Matute, A. I., Sanz, M. L.** (2023). Simultaneous microwave-assisted extraction of bioactive compounds from aged garlic. *Journal of Chromatography A*, 464128.
 12. **Asakuma, Y., Yakata, R., Hyde, A., Phan, C., Hoang, S. A.** (2025). Influence of the Shape Factor on the Heating of an Aqueous Solution by Microwave. *Microwave*, 1(3), 10.
 13. **Sillero, L., Marcial, M., Olaizola, I., Banales, J. M., Hernández-Ramos, F., Erdocia, X., Morales, A.** (2025). Sustainable recovery of bioactive compounds from forest residues using microwave-assisted extraction. *Separation and Purification Technology*, 134993.
 14. **Mandal, V., Mohan, Y. and Hemalatha, S.** (2007). Microwave assisted extraction – an innovative and promising extraction tool for medicinal plant research. *Pharmacognosy reviews*. 1(1),7-18.
 15. **Nikhita, Y., Shubham, S., Jaison, S. J., Sushil, K.** (2020). Microwave assisted extraction of bioactive compounds: A brief review. *Journal of Indian Chemical Society*, 97, 10a, 1751–1756.
 16. **Valdés, A., Vidal, L., Beltrán, A., Canals, A., & Garrigós, M. C.** (2015). Microwave-Assisted Extraction of Phenolic Compounds from Almond Skin By-products (*Prunus amygdalus*): A Multivariate Analysis Approach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(22), 5395–5402.
 17. **Alara, O. R., Abdurahman, N. H., & Ali, H. A.** (2023). Optimization of microwave-enhanced extraction parameters to recover phenolic compounds and antioxidants from *Corchorus olitorius* leaves. *Chemical Papers*.
 18. **Zhang, Y., Xiang, Z., Xia, R., Chen, W., Zhang, X., Lei, H., Wei, F., & Yuan, Y.** (2025). Comprehensive analysis of phenolic profile, their antioxidant activities, and physicochemical characteristics of rapeseed oil under various microwave and storage conditions. *Food Chemistry: X*, 29, 102637.
 19. **Terigar, B. G., Balasubramanian, S., Boldor, D., Xu, Z., Lima, M., & Sabliov, C. M.** (2010). Continuous microwave-assisted isoflavone extraction system: Design and performance evaluation. *Bioresource Technology*, 101(7), 2466-2471.
 20. **Sparr Eskilsson, C., Björklund, E.** (2000). Analytical-scale microwave-assisted extraction. *Journal of Chromatography A*, 902(1), 227-250.
 21. **Vo, T. P., Ho, T. A. T., Truong, K. V., Ha, N. M. H., Nguyen, D. Q.** (2024). Combining novel extraction techniques with natural deep eutectic solvent to acquire phenolic and terpenoid compounds from *Paris polyphylla* roots. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101544.
 22. **Tomasi, I. T., Santos, S. C. R., Boaventura, R. A. R., & Botelho, C. M. S.** (2023). Optimization of microwave-assisted extraction of phenolic compounds from chestnut processing waste using response surface methodology. *Journal of Cleaner Production*, 136452.
 23. **Spigno, G., De Faveri, D. M.** (2009). Microwave-

- assisted extraction of tea phenols: A phenomenological study. *Journal of Food Engineering*, 93(2), 210-217.
24. **Flórez, N., Conde, E., & Domínguez, H.** (2014). Microwave assisted water extraction of plant compounds. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 90(4), 590-607.
25. **Vo, T. P., Nguyen, N. T. U., Le, V. H., Phan, T. H., Nguyen, T. H. Y., & Nguyen, D. Q.** (2023). Optimizing Ultrasonic-Assisted and Microwave-Assisted Extraction Processes to Recover Phenolics and Flavonoids from Passion Fruit Peels. *ACS Omega*.
26. **Di Meo, M. C., De Cristofaro, G. A., Imperatore, R., Rocco, M., Giaquinto, D., Palladino, A., Zotti, T., Vito, P., Paolucci, M., & Varricchio, E.** (2021). Microwave-Assisted Extraction of Olive Leaf from Five Italian Cultivars: Effects of Harvest-Time and Extraction Conditions on Phenolic Compounds and *In Vitro* Antioxidant Properties. *ACS Food Science & Technology*, 2(1), 31-40.
27. **Rodríguez Seoane, P., Flórez-Fernández, N., Conde Piñeiro, E., & Domínguez González, H.** (2017). Microwave-Assisted Water Extraction. *Water Extraction of Bioactive Compounds*, 163-198.
28. **Pan, X., Niu, G., & Liu, H.** (2003b). Microwave-assisted extraction of tea polyphenols and tea caffeine from green tea leaves. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 42(2), 129-133.
29. **Chan, C.-H., Yusoff, R., Ngoh, G.-C., Kung, F. W.-L.** (2011). Microwave-assisted extractions of active ingredients from plants. *Journal of Chromatography A*, 1218(37), 6213-6225.
30. **Chen, L., Song, D., Tian, Y., Ding, L., Yu, A., & Zhang, H.** (2008). Application of on-line microwave sample-preparation techniques. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 27(2), 151-159.
31. **Chan, C.-H., Lim, J.-J., Yusoff, R., & Ngoh, G.-C.** (2015). A generalized energy-based kinetic model for microwave-assisted extraction of bioactive compounds from plants. *Separation and Purification Technology*, 143, 152-160.
32. **Wang, L., & Weller, C. L.** (2006). Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. *Trends in Food Science & Technology*, 17(6), 300-312.
33. **Ruan, G.-H., & Li, G.-K.** (2007). The study on the chromatographic fingerprint of *Fructus xanthii* by microwave assisted extraction coupled with GC-MS. *Journal of Chromatography B*, 850(1-2), 241-248.
34. **Nikhita, Y., Shubham, S., Jaison, S. J., & Sushil, K.** (2020). Microwave assisted extraction of bioactive compounds: A brief review. *Journal of Indian Chemical Society*, 97,10a, 1751-1756.
35. **Chan, C.-H., Lim, J.-J., Yusoff, R., & Ngoh, G.-C.** (2015). A generalized energy-based kinetic model for microwave-assisted extraction of bioactive compounds from plants. *Separation and Purification Technology*, 143, 152-160.
36. **Terigar, B. G., Balasubramanian, S., Boldor, D., Xu, Z., Lima, M., & Sabliov, C. M.** (2010). Continuous microwave-assisted isoflavone extraction system: Design and performance evaluation. *Bioresource Technology*, 101(7), 2466-2471.
37. **Li, Y., Han, L., Ma, R., Xu, X., Zhao, C., Wang, Z., Chen, F., & Hu, X.** (2012). Effect of energy density and citric acid concentration on anthocyanins yield and solution temperature of grape peel in microwave-assisted extraction process. *Journal of Food Engineering*, 109(2), 274-280.
38. **Gao, M., Song, B.-Z., & Liu, C.-Z.** (2006). Dynamic microwave-assisted extraction of flavonoids from *Saussurea medusa* Maxim cultured cells. *Biochemical Engineering Journal*, 32(2), 79-83.
39. **Desai, M., Parikh, J., & Parikh, P. A.** (2010). Extraction of Natural Products Using Microwaves as a Heat Source. *Separation Purification Reviews*, 39 (1-2), 1-32.
40. **Wang, W., Zhao, C., Sun, J., Wang, X., Zhao, X., Mao, Y., Li, X., & Song, Z.** (2015). Quantitative measurement of energy utilization efficiency and study of influence factors in typical microwave heating process. *Energy*, 87, 678-685.
41. **Yang, X. H., & Tang, J.** (2002). Advances In Bioprocessing Engineering. *WORLD SCIENTIFIC*.
42. **Sparr Eskilsson, C., & Björklund, E.** (2000). Analytical-scale microwave-assisted extraction. *Journal of Chromatography A*, 902(1), 227-250.

Received 07 February 2026
Approved 03 March 2026
Available in Internet 31 March 2026