

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-2-12-19>
УДК 620.9; 621.35; 620.1

ЭНЕРГИЯ САҚТАУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫНА АРНАЛҒАН ШАЙ БИОМАССАСЫНАН АЛЫНҒАН ЭЛЕКТРОДТЫҚ МАТЕРИАЛДЫ МИКРОТОЛҚЫНДЫ ӘДІСПЕН СИНТЕЗДЕУ

Ә. Н. Дүйсенбек^{1,2,3*}, Р. Е. Бейсенов^{2,3}, Қ. Асқарұлы^{1,3}, Е. Е. Бейсенова^{2,3}

¹ Қ. И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ, Алматы, Қазақстан

² Қазақ-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

³ Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: aselka_star@mail.ru

Бұл мақала энергияны сақтау жүйелеріне арналған көміртекті материалды шай қалдықтарынан алу және оның қасиеттерін зерттеуге бағытталған. Синтез процесі микротолқынды көміртектендіру әдісімен және CO_2 ортасында физикалық белсендірумен жүзеге асырылды. Үлгілердің морфологиялық және құрылымдық сипаттамалары сканерлеуші электрондық микроскопия, рентгенфазалық талдау және Раман спектроскопиясы әдістерімен анықталды. Синтезделген белсендірілген көміртек құрылымының жоғары кеуектілігі және жақсы электрөткізгіштік қасиеттерімен ерекшеленді. Рентгенфазалық талдау нәтижесінде (002) және (100) дифракциялық пиктері байқалды. Бұл алынған көміртекті материалдың графит тәрізді құрылым түзуге бейімділігін көрсетеді. Раман спектрінде байқалған D ($\approx 1350 \text{ см}^{-1}$) және G ($\approx 1580 \text{ см}^{-1}$) пиктері көміртек құрылымындағы ақаулар мен графиттік домендердің бар екенін көрсетті. $I_D/I_G=0.73$, бұл материалдың орташа реттелген құрылымға ие екенін білдіреді. Шай қалдығынан алынған белсендірілген көміртегінің электрохимиялық қасиеттерін талдау циклдік вольтамперометрия, гальваностатикалық заряд-разряд және импеданстық спектроскопия арқылы жүргізілді. Зерттеу нәтижелері бойынша, 500 мА/г ток тығыздығында көміртегінің меншікті сыйымдылығы 116 Ф/г-қа дейін артты. Алынған нәтижелер суперконденсаторларға арналған көміртекті материалдарды әзірлеудің болашағы зор екенін және олардың энергия сақтау құрылғыларында тиімділікті арттыруға мүмкіндік беретінін айқындайды.

Түйін сөздер: шай қалдықтары, көміртектендіру, физикалық белсендіру, микротолқын, энергия сақтау құрылғылары, суперконденсатор.

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда әлемдік өркениет қарқынды дамумен қатар, энергия тұтынудың үнемі өсуімен сипатталады. Халық санының артуы, өнеркәсіптік өндірістің ұлғаюы және көлік инфрақұрылымының дамуы энергияға деген сұранысты күрт өсіріп отыр. Бұл үрдіс энергетикалық ресурстардың таусылу қаупін ғана емес, сонымен қатар қоршаған ортаға түсетін экологиялық жүктемені де күшейтеді. Баламалы энергия көздері осы мәселені шешудің тиімді жолы болғанымен, олардың табиғи құбылыстарға тәуелділігі энергияны тұрақты жеткізуді қиындатады. Осыған байланысты энергия сақтау жүйелерін жетілдіру – қазіргі энергетика ғылымының стратегиялық міндеттерінің бірі [1–3].

Соңғы онжылдықтарда энергия сақтау жүйелерін (суперконденсаторлар, литий-ионды аккумуляторлар) жетілдіру электрод материалдарын іздеуді жеделдетті. Биомасса негізіндегі жоғары беткі ауданды, кеуекті әрі жақсы электрөткізгіш көміртекті материалдар экологиялық қолжетімді балама ретінде ерекше қызығушылық тудырады [4–8].

Көміртекті материалдар алудың перспективалы тәсілдерінің бірі – микротолқынды көміртектендіру, ол прекурсорларды жылдам әрі энергия үнемді термиялық өндеумен ерекшеленеді. Бұл әдістің

артықшылықтарына жоғары қыздыру жылдамдығы, энергия шығынының аздығы, жылудың материал көлемі бойынша біркелкі таралуы және процесті дәл бақылау мүмкіндігі жатады [9–12].

Микротолқынды көміртектендіру биомасса негізіндегі көміртек қаңқасын қалыптастырады, алайда бастапқыда кеуектілік дәрежесі шектеулі болуы мүмкін, сондықтан келесі кезеңде материалдың беті мен ішкі арналарын дамыту мақсатында физикалық белсендіру (CO_2 немесе бу) қолданылады. Бұл тәсіл химиялық реагенттерді пайдаланбайды, ерітінді қалдықтарын бейтараптандыруды қажет етпейді, кейінгі жуу қадамдарын жеңілдетеді, коррозиялық әсерді төмендетеді және материалдың электрохимиялық тұрақтылығын жақсартады [13–15].

Дәстүрлі пешке негізделген белсендіру әдістерімен салыстырғанда, микротолқынды пеш көмегімен CO_2 белсендіру тәсілі көміртекті материалды жылдам және көлемді in-situ қыздыруды қамтамасыз етеді. Бұл C- CO_2 газдандыру реакциясының кинетикасын жеделдетеді. Бұл химиялық белсендіргіштерге қажеттілікті жоя отырып, өндеу уақытын және жалпы энергия тұтынуын айтарлықтай азайтуға мүмкіндік береді.

Шай қалдықтары – белсендірілген көміртегіні синтездеуге кеңінен таралған, жаңартылатын және

арзан биомасса шикізаты. Алайда шай қалдықтарына негізделген көміртектердің басым бөлігі КОН, H_3PO_4 немесе ZnCl_2 сияқты химиялық белсендіргіштерді қолдану арқылы немесе жоғары температурада ұзақ уақытқа созылатын дәстүрлі пеш арқылы белсендіру пайдаланылады. Тіпті микротолқынды сәулеленуді қолданатын соңғы әдістердің өзі химиялық активаторларды және көпсатылы жууды қажет етеді [16,17], бұл олардың экологиялық тұрақтылығын шектейді. Дегенмен, ғылыми деректерді талдау көрсеткендей, CO_2 қолданылатын микротолқынды физикалық белсендіру тәсілдері белгілі болғанымен, химиялық реагенттер мен еріткіштерді толық пайдаланбай жүзеге асырылатын жүйелер жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Осыған байланысты шай қалдықтарынан жоғары өнімді кеуекті көміртектерді алудың экологиялық таза, жылдам және энергия тиімді әдістерін әзірлеу өзекті болып отыр.

Бұл жұмыста биомасса ретінде пайдаланылған шай қалдығы таңдалды. Синтездеу микротолқынды көміртектендіру және физикалық белсендіру (CO_2 газы) әдістерімен жүргізілді. Микротолқындық сәулеленудің биомассаның көміртекті компоненттерімен өзара әсерлесуі материалды тез әрі біркелкі қыздыруды қамтамасыз етеді. Нәтижесінде құрылымдық тұрғыдан тұрақты, жақсы электрөткізгіш қасиетке ие белсендірілген көміртек алынып, ол электрохимиялық энергия сақтау құрылғыларында қолдануға жарамды екені анықталды.

ЗЕРТТЕУ ӘДІСІ

Химиялық реагенттер:

Аргон (99,993%, Ikhsan Technogas Ltd), көмірқышқыл газы (CO_2 , 99,99%, Ikhsan Technogas Ltd), карбид кремний (SiC), поливинилфториді PVDF (EQF), электр өткізгіш көміртекті қара ұнтақ (EQ-Lib-SuperC45, MTI Corporation), N-метил-2-пирролидон (NMP, $\geq 99,0\%$, Sigma Aldrich), никель фольгасы (MF-Ni-Foil-25u-105, MTI Corporation).

Бұл зерттеуде биомасса ретінде шай қалдықтары пайдаланылды. Көміртектендіру процесіне дейін шай қалдығы тазартылған сумен мұқият жуылып, 120°C температурада 10 сағат бойы кептірілді. Дайын, кептірілген шай қалдығының 3 г үлгісі керамикалық реакторға орналастырылып, микротолқынды пеште көміртектендіру жүргізілді. Көміртектендіру процесі зертханалық бейімделген микротолқынды пеште (Samsung, керамикалық камералы) 2.45 ГГц жиілікте және максималды қуаты 800 Вт жағдайында жүргізілді. Қондырғы тік орналасқан керамикалық реактормен жабдықталған. Реактор көлемі микротолқынды өндеуге бейімделген зертханалық жүйеге сәйкес таңдалды.

Қыздыру тиімділігін арттыру мақсатында микротолқынды пештің ішіне ұнтақ күйіндегі кремний карбидімен (SiC) толтырылған тигель орналасты-

рылды. SiC микротолқынды сәулеленуді тиімді сіңіру қабілетінің арқасында реакциялық аймақты біркелкі қоршады және қажетті температураға тез жетуді қамтамасыз етті.

Көміртектендіру процесі 800 Вт қуатта, инертті аргон атмосферасында (ағын жылдамдығы $250\text{ см}^3/\text{мин}$), 30 минут бойы жүргізілді. Пеш ішіндегі температура инфрақызыл пирометр арқылы бақыланып, көміртектендіру кезеңінде реакциялық аймақтағы температура $800\text{--}850^\circ\text{C}$ диапазонында болғаны анықталды. Көміртектендіруден кейін алынған көміртектендірілген шай қалдығы (КШҚ) CO_2 атмосферасында 30 минут бойы физикалық белсендіру процесінен өтті. Көміртектендіру нәтижесінде алынған өнімнің шығымы бастапқы массаға қатысты шамамен 33,3% құрады. Белсендіру дәл осы микротолқынды пеш қондырғысында, үздіксіз берілетін CO_2 ағыны (ағын жылдамдығы $150\text{ см}^3/\text{мин}$) мен $800\text{--}850^\circ\text{C}$ диапазонында температураны ұстап тұру арқылы жүзеге асырылды. Дайын болған белсендірілген шай қалдығы (БШҚ) деп белгіленді. Кейінгі CO_2 атмосферасында жүргізілген физикалық белсендіру процесінде өнім шығымы физикалық белсендіру үшін 23,7% болды.

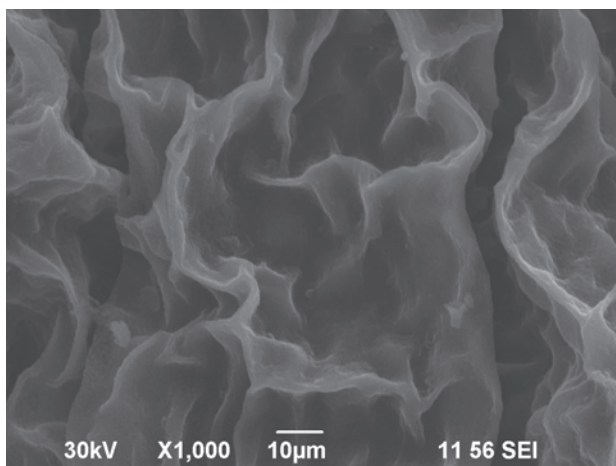
Электрод дайындау және электрохимиялық өлшеулер

Электродтық материал 70:20:10 массалық қатынасында белсендірілген шай қалдығы, өткізгіш көміртекті күйе және поливинилиденфторид байланыстырушы компоненттерін цирконийлі келіде (zirconium mortar) қолмен механикалық араластыру арқылы дайындалды. Ток коллекторына жағуға арналған суспензияны алу үшін 1 г ұнтақ 4 мл N-метил-2-пирролидон еріткішімен гомогенді масса түзілгенше араластырылды. Дайын қоспа 1 см^2 никель фольгасына жағылды. Белсенді материалдың орташа массасы 6,09 мг құрады, бұл $\approx 6,09\text{ мг}/\text{см}^2$ жүктемеге сәйкес келеді. Кейін 120°C температурада 10 сағат бойы ыстық ауамен кептіретін шкафта (ШС-80, Беларусь) кептірілді.

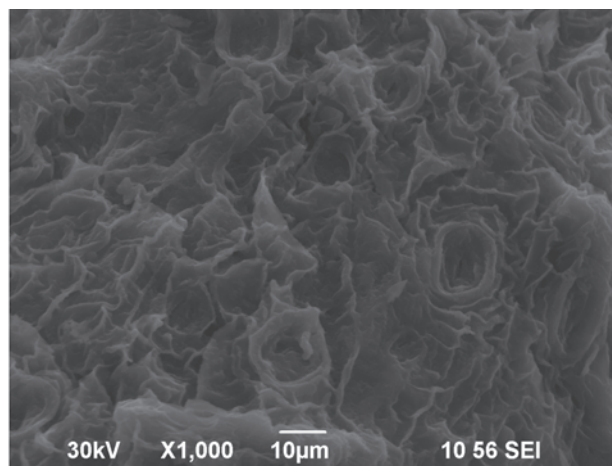
Электрохимиялық өлшеулер Elins P-40X потенциостат-гальваностаты арқылы екі электродты конфигурацияда жүргізілді. Электролит ретінде 6 М КОН су ерітіндісі қолданылды, ал сепаратор ретінде сүзгі қағазы пайдаланылды. Мұндай конфигурация нақты құрылғыға жақын жағдайларда материалдың электрохимиялық қасиеттерін бағалауға мүмкіндік береді. Циклдік вольтамметрия (ЦВ) деректері 20, 40, 80 және 160 мВ/с сканерлеу жылдамдықтарында алынды, ал гальваностатикалық заряд-разряд (ГЗР) сынақтары 100, 500, 1000 және 2000 мА/г ток мәндерінде өткізілді. Электрохимиялық импеданстық спектроскопия (ЭИС) өлшеулері 100 кГц-тен 10 мГц-ке дейінгі жиілік диапазонында, 5 мВ амплитудасында жүргізілді.

ЗЕРТТЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Морфологиялық және құрылымдық сипаттамаларын зерттеу. Көміртектендірілген және белсендірілген шай қалдықтарының морфологиялық және құрылымдық ерекшеліктерін зерттеу үшін сканерлеуші электрондық микроскопия (СЭМ) (JEOL JSM-6490 LA) қолданылды. СЭМ суреттері белсендіруге дейінгі және кейінгі үлгілер микроқұрылымында айқын айырмашылық бар екенін көрсетеді. Көміртектендірілген материалдың құрылымы айқын қабыршақты пішіндерден тұрады, беті толқынды және қатпарлы болып келеді (1а-сурет). Көрінетін қуыстар мен ойықтар аздап дамыған кеуекті құрылымды сипаттайды. 1б-суретте физикалық белсендіру кезінде айқын көпіршікті және қуысты құрылым байқалады. Жаксы дамыған макро және мезокеуектер материалдың жалпы беткі ауданын арттырады, электролиттің иондары үшін тиімді тасымал жолдарын қамтамасыз етеді. Бұл – физикалық белсендірудің көміртекті материалдың кеуектілігін едәуір жақсартатынын көрсететін айқын дәлел.



а



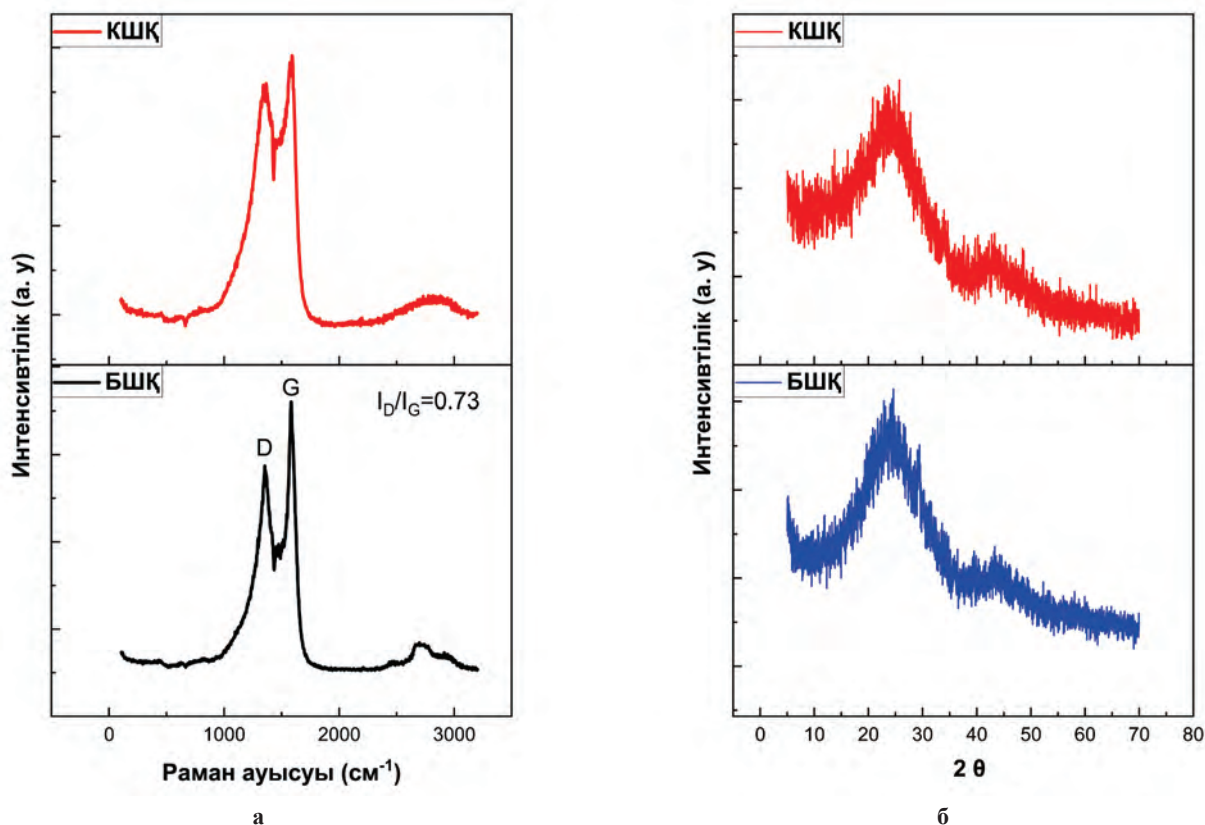
б

*а1-сурет. Шай қалдығынан алынған көміртекті материалдың СЭМ суреттері:
а) көміртектендірілген; б) белсендірілген*

Раман спектроскопиясы көміртекті материалдардың құрылымдық ретін, ақауларын және гибридтену дәрежесін анықтаудың тиімді әдісі болып табылады. Белсендірілген шай қалдығының құрылымдық қасиеттері осы әдіс арқылы зерттелді. 2а-суретте көрсетілген спектрде sp^2 -гибридтелген көміртек атомдарының жазықтықтағы тербеліс режиміне сәйкес келетін G жолағы (шамамен $1570-1590\text{ см}^{-1}$) және графиттік тордағы құрылымдық ақауларды, шеттерді және реттілігі төмен домендерді сипаттайтын D жолағы (шамамен $1350-1360\text{ см}^{-1}$) байқалады. Анықталған $I_D/I_G=0,73$ интенсивтік қатынасы материалда графиттік (sp^2) домендердің жеткілікті дамығанын, бірақ құрылымда ақаулардың

көрсетеді. CO_2 атмосферасында физикалық белсендіру арқылы өңделген белсендірілген шай қалдығының беткі ауданы $850\text{ м}^2/\text{г}$ дейін айтарлықтай артты. Кеуек өлшемдерінің $1,27-1,87\text{ нм}$ аралығында болуы микрокеуекті құрылымның басым қалыптасқанын көрсетсе, ВЖН әдісімен анықталған $4,87-5,04\text{ нм}$ орташа кеуек ені материал құрамында мезокеуектердің де бар екенін растайды.

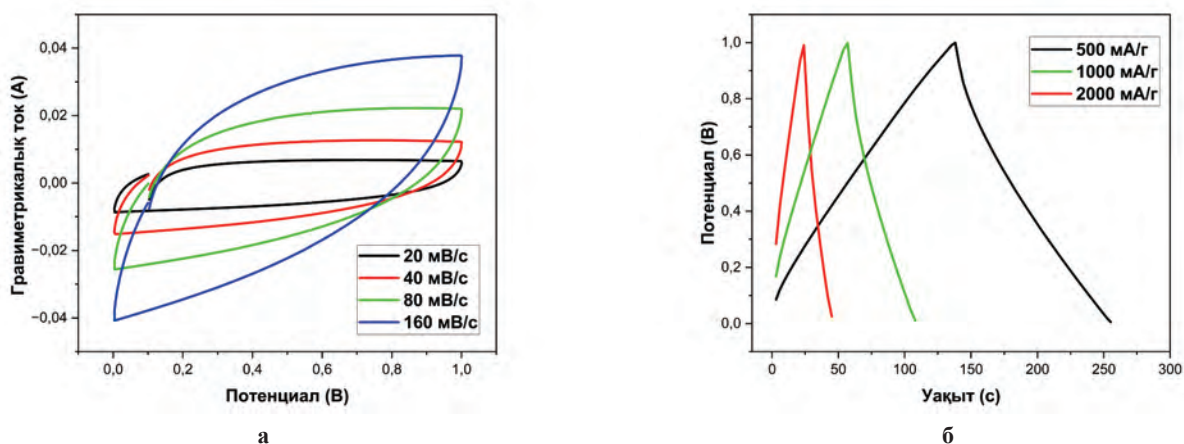
Белсендірілген шай қалдықтарының электрохимиялық қасиеттері ЦВ, ГЗР және ЭИС көмегімен зерттелді. 3а-суретте 20, 40, 80 және 160 мВ/с сканерлеу жылдамдығында жазылған БШҚ негізінде жиналған электродтың вольт-ампер қисықтары көрсетілген.



2-сурет. Көміртектендірілген және белсендірілген шай қалдығының (а) Раман спектрлері; (б) Рентгендік дифракция спектрлері

Циклдік вольтамперометрия қисықтары бойынша есептелген меншікті сыйымдылықтар сканерлеу жылдамдығы артқан сайын біртіндеп төмендейді. Айта кету керек, циклдік вольтамперометриядан алынған меншікті сыйымдылықтар екі электродты конфигурацияда табиғи түрде төмен болады, әсіресе жоғары сканерлеу жылдамдықтарында, сондықтан материалдардың заряд жинақтау қабілетін

толықтай бейнелей алмайды. Төменде келтірілген гальваностатикалық заряд-разряд нәтижелері нақты сыйымдылықты дәлірек көрсетеді. БШҚ электроды үшін сыйымдылық 20 мВ/с жылдамдықта 43,8 Ф/г-тан 160 мВ/с кезінде 21,0 Ф/г-қа дейін төмендейді, бұл 47,9% сыйымдылықтың сақталуына сәйкес келеді. Мұндай төмендеу жоғары сканерлеу жылдамдықтарында электролит иондарының кеуекті



3-сурет. БШҚ үшін (а) 20, 40, 80 және 160 мВ/с сканерлеу жылдамдықтарындағы ЦВ қисықтары; (б) 500, 1000 және 2000 мА/г ток тығыздығындағы ГЗР қисықтары

құрылымға толық ене алмауымен, яғни диффузиялық шектеулермен, сондай-ақ омдық кедергінің (IR drop) артуымен түсіндіріледі.

3б-суретте 500, 1000 және 2000 мА/г ток тығыздықтарында алынған гальваностатикалық заряд-разряд қисығы көрсетілген.

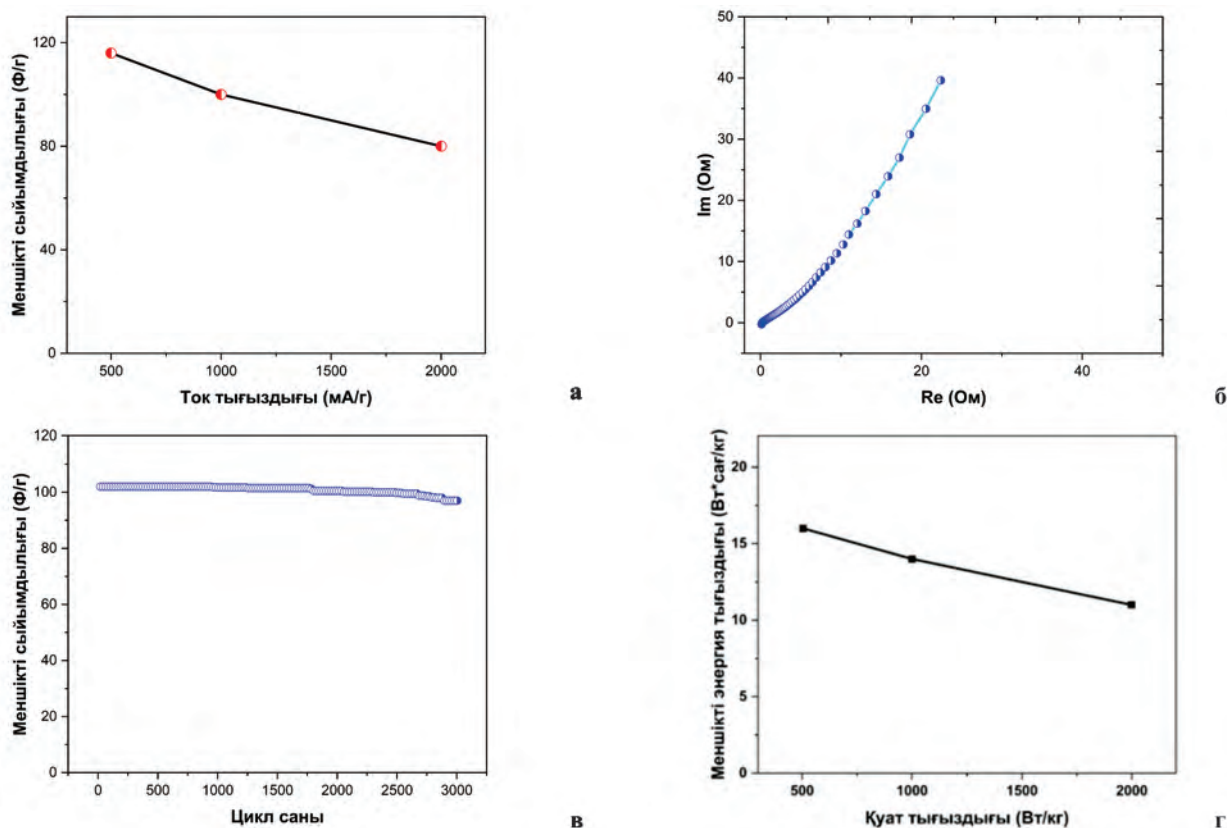
БШҚ үлгісінің меншікті сыйымдылығы ток тығыздығының 500, 1000 және 2000 мА/г мәндерінде сәйкесінше 116, 100 және 80 Ф/г құрады. Алынған меншікті сыйымдылық мәндері (500 мА/г кезінде 116 Ф/г және 2000 мА/г кезінде 80 Ф/г) биомасса-дан алынған CO_2 арқылы физикалық белсендірілген көміртегі үшін сипатталған мәндерге сәйкес келеді. Бұл химиялық белсендірусіз-ақ жоғары электрохимиялық сипаттамаларға қол жеткізу мүмкіндігін көрсетеді. Жылдамдық тұрғысынан алғанда, ток тығыздығын 500-ден 2000 мА/г-қа дейін арттыру шамамен ~70% сыйымдылықтың сақталуына алып келеді. Әдеби деректерге сәйкес, физикалық белсендіру нәтижесінде алынған көміртектердің меншікті сыйымдылығы химиялық белсендіру арқылы синтезделген материалдардан төмен болатыны белгілі [20,21]. Сондай-ақ, физикалық белсендірудің (CO_2 газы) экологиялық қауіпсіздігі, қалдық ерітінділердің болмауы және ма-

териал құрамының жоғары химиялық тазалығы басты артықшылығы болып саналады.

Симметриялық суперконденсаторлардың энергия және қуат тығыздықтары гальваностатикалық заряд-разряд қисықтары негізінде есептелді. БШҚ электроды үшін энергия тығыздығы 16.1, 14.0 және 11.1 Вт·сағ/кг төмендеді, ал сәйкес қуат тығыздығы 504, 1000 және 1998 Вт/кг құрады. Алынған нәтижелер Ragone диаграммасында көрсетілген.

4а-суретте БШҚ үлгісінің меншікті сыйымдылығы ток тығыздығының артуына байланысты төмендейді. Мұндай төмендеу жоғары ток тығыздықтарында электролит иондарының кеуек құрылымына толық енуінің шектелуімен және заряд алмасу уақытының қысқаруымен түсіндіріледі.

Жүйенің электрохимиялық реакциясын зерттеу мақсатында электрохимиялық импеданстық спектроскопия (ЭИС) өлшеулері жүргізілді. 4б-суретте БШҚ негізіндегі электродтың ЭИС қисығы көрсетілген. Электродтың ішкі кедергісі (R_s) суперконденсатордың зарядтау және разрядтау процестерінің жылдамдығына тікелей әсер ететін маңызды параметр болып табылады, оның шамадан тыс артуы құрылғының шығыс қуатының төмендеуіне және энергия тиімділігінің на-



4-сурет. БШҚ үлгісінің (а) 100, 500, 1000 және 2000 мА/г ток тығыздығы кезіндегі меншікті сыйымдылықтары (б) ЭИС қисығы (в) 1000 мА/г тұрақты ток тығыздығындағы циклдік тұрақтылық қисығы және (г) энергия тығыздығы мен қуат тығыздығы арасындағы байланысты көрсететін Ragone графигі

ЭНЕРГИЯ САҚТАУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫНА АРНАЛҒАН ШАЙ БИОМАССАСЫНАН АЛЫНҒАН ЭЛЕКТРОДТЫҚ МАТЕРИАЛДЫ МИКРОТОЛҚЫНДЫ ӘДІСПЕН СИНТЕЗДЕУ

1-кесте. Қос қабатты суперконденсаторлар үшін әртүрлі биомассадаң CO₂ арқылы физикалық белсендіру әдісімен алынған белсендірілген көмір материалдарының салыстырмалы сипаттамалары

№	Биомасса түрі	Әдіс	Ұяшық конфигурациясы	Меншікті сыйымдылық (Ф/г)	Ток тығыздығы (А/г)	Жыл	Дереккөз
1	Құрма дәндері	Көміртектендіру (600 °C); CO ₂ арқылы белсендіру (850 °C)	екі электродты	88	0.5	2023	[21]
2	Күріш қауыздары	CO ₂ арқылы белсендіру (900 °C)	екі электродты	40	1	2023	[22]
3	Жаңғақ қабықтары	CO ₂ арқылы белсендіру (900 °C)	екі электродты	109	1	2023	[22]
4	Орман жаңғағының қабықтары	CO ₂ арқылы белсендіру (700 °C)	екі электродты	107	1	2023	[23]
5	Шай қалдықтары	Микротолқынды көміртектендіру және CO ₂ арқылы белсендіру	екі электродты	116	1	2026	осы жұмыс

шарлауына әкеледі. Өлшеулер 5 мВ амплитудасында 100 кГц-тен 10 мГц-ке дейінгі жиілік диапазонында жүргізілді.

Диаграммада төмен жиіліктер аймағында айқын көлбеу сызық байқалады, бұл иондардың электродтың кеуекті құрылымына енуімен байланысты диффузиялық процестердің басым екенін көрсетеді. Жоғары жиілік облысында жартылай шеңбер дерлік байқалмайды, бұл материалдың заряд тасымалдау кедергісі (Rct) төмен екендігін және беткі реакциялардың жылдам жүретінін білдіреді.

Ұзақ мерзімді цикл (4в-сурет) БШҚ негізіндегі электродтың беріктігін одан әрі растайды: 1000 мА/г кезінде 3000 циклден кейін БШҚ бастапқы сыйымдылығының 95% сақтайды, ал кулондық тиімділік 90%-ға жақын болып қалады, бұл жақсы өткізгіштікті және қайта зарядтау-разрядтау кезіндегі жанама реакциялардың елеусіз екенін көрсетеді.

Нәтижесінде, СЭМ суреттерде байқалған материалдың морфологиясы белсенді беткі ауданды арттыратын және электролит диффузиясын жеңілдететін, осылайша электрохимиялық өнімділікті арттыратын жақсы дамыған кеуекті құрылымды көрсетеді. Электрохимиялық импеданс спектроскопиясын талдау зарядтың берілуіне төмен кедергіні көрсетеді, ал жоғары циклдік тұрақтылық электрод құрылымының беріктігін растайды. Сондықтан алынған құрылымдық және оптикалық сипаттамалар материалдың электрохимиялық қасиеттерінің жақсарғанын тікелей түсіндіреді.

Қорытынды

Зерттеу барысында шай қалдықтары микротолқынды көміртектендіру және CO₂ атмосферасында физикалық белсендіру арқылы өңделіп, белсендірілген көміртек материалы алынды. Морфологиялық және құрылымдық талдаулар материалдың дамыған кеуекті екенін және аморфты табиғатқа ие екенін растады. Бұл ерекшеліктер оның электрохимиялық мінезін жақсартуға ықпал етті.

Рентгендік дифракцияда (002) және (100) пиктерінің көрінуі көміртекті матрицаның графит тәрізді құрылым түзуге бейімділігін көрсетті. Белсендірілген шай қалдығының беткі ауданы 511 м²/г көрсетті және бұл кеуектердің тиімді түзілуін растайды.

Белсендірілген шай қалдығының меншікті сыйымдылығы 500 мА/г ток тығыздығында 116 Ф/г-қа жетті. Электрохимиялық импеданстық талдау төмен ішкі кедергіні және жақсы иондық өткізгіштікті көрсетті. 1000 мА/г кезінде 3000 циклден кейін белсендірілген шай қалдығының бастапқы сыйымдылығының 95% сақталды. Осы нәтижелер алынған белсендірілген көміртектің суперконденсатор электродтары ретінде қолдануға перспективалы материал екенін айқындайды.

Алғыс білдіру

Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің BR28712901 ғылыми зерттеулерді гранттық қаржыландыру бағдарламасы арқылы қолдау тапты.

Қолданылған әдебиет тізімі / REFERENCES

1. H.A. Behabtu, M. Messagie, T. Coosemans, M. Bercebar, K. Anlay Fante, A.A. Kebede, J.V. Mierlo, A Review of Energy Storage Technologies' Application Potentials in Renewable Energy Sources Grid Integration, Sustainability 12 (2020) 10511. <https://doi.org/10.3390/su122410511>.
2. J. Mitali, S. Dhinakaran, A.A. Mohamad, Energy storage systems: a review, Energy Storage Sav. 1 (2022) 166–216. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002>.
3. M.R. Sarker, M.H.M. Saad, A. Riaz, M.S.H. Lipu, J.L. Olazagoitia, Micro Energy Storage Systems in Energy Harvesting Applications: Analytical Evaluation towards Future Research Improvement, Micromachines 13 (2022) 512. <https://doi.org/10.3390/mi13040512>.
4. J. Castro-Gutiérrez, A. Celzard, V. Fierro, Energy Storage in Supercapacitors: Focus on Tannin-Derived Carbon Electrodes, Front. Mater. 7 (2020) 217. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00217>.
5. u V.M.G. Ch, Review of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles, (2024).

6. D. Deng, Li-ion batteries: basics, progress, and challenges, *Energy Sci. Eng.* 3 (2015) 385–418. <https://doi.org/10.1002/ese3.95>.
7. C.V.M. Gopi, R. Ramesh, Review of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicles, *Results Eng.* 24 (2024) 103598. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103598>.
8. M.T. Lawder, B. Suthar, P.W.C. Northrop, S. De, C.M. Hoff, O. Leitermann, M.L. Crow, S. Santhanagopalan, V.R. Subramanian, Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications, *Proc. IEEE* 102 (2014) 1014–1030. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2317451>.
9. T.M.W.J. Bandara, A.M.B.S. Alahakoon, B.-E. Mellander, I. Albinsson, Activated carbon synthesized from Jack wood biochar for high performing biomass derived composite double layer supercapacitors, *Carbon Trends* 15 (2024) 100359. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2024.100359>.
10. Y. Dou, X. Liu, K. Yu, X. Wang, W. Liu, J. Liang, C. Liang, Biomass porous carbon derived from jute fiber as anode materials for lithium-ion batteries, *Diam. Relat. Mater.* 98 (2019) 107514. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.107514>.
11. G. Greco, R.L.S. Canevesi, C. Di Stasi, A. Celzard, V. Fierro, J.J. Manyà, Biomass-derived carbons physically activated in one or two steps for CH₄/CO₂ separation, *Renew. Energy* 191 (2022) 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.035>.
12. X. Liu, C. Ma, J. Li, B. Zielinska, R.J. Kalenczuk, X. Chen, P.K. Chu, T. Tang, E. Mijowska, Biomass-derived robust three-dimensional porous carbon for high volumetric performance supercapacitors, *J. Power Sources* 412 (2019) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.11.032>.
13. M. Selvam S, B. Paramasivan, Microwave assisted carbonization and activation of biochar for energy-environment nexus: A review, *Chemosphere* 286 (2022) 131631. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131631>.
14. P.N.Y. Yek, R.K. Liew, M.S. Osman, C.L. Lee, J.H. Chuah, Y.-K. Park, S.S. Lam, Microwave steam activation, an innovative pyrolysis approach to convert waste palm shell into highly microporous activated carbon, *J. Environ. Manage.* 236 (2019) 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.010>.
15. R. Hoseinzadeh Hesas, A. Arami-Niya, W.M.A. Wan Daud, J.N. Sahu, Preparation and Characterization of Activated Carbon from Apple Waste by Microwave-Assisted Phosphoric Acid Activation: Application in Methylene Blue Adsorption, *BioResources* 8 (2013) 2950–2966. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.2950-2966>.
16. X. Bo, K. Xiang, Y. Zhang, Y. Shen, S. Chen, Y. Wang, M. Xie, X. Guo, Microwave-assisted conversion of biomass wastes to pseudocapacitive mesoporous carbon for high-performance supercapacitor, *J. Energy Chem.* 39 (2019) 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.006>.
17. Y. Cheng, M. Chen, K. Xia, H. Li, G. Xu, L. Yang, Z. Zhao, P. Liu, L. Wang, Rapid conversion of biomass to hierarchical porous carbons via one-step microwave carbonization/activation for long cycle-stable supercapacitor and zinc-ion capacitor, *J. Power Sources* 624 (2024) 235523. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.235523>.
18. R. Jiménez-Pérez, M.I. González-Sánchez, A. Gomis-Berenguer, J. Iniesta, E. Valero, Enhanced surface properties and electrochemical performance of carbon-based screen-printed electrodes via hydrogen peroxide activation, *Electrochimica Acta* 536 (2025) 146721. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.146721>.
19. M.K. Nayak, B.B. Sahoo, D.N. Thatoi, S. Nazari, R. Ali, A.J. Chamkha, Recent advances on supercapacitor electrode materials from biowastes- a review, *J. Sci. Adv. Mater. Devices* 9 (2024) 100734. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2024.100734>.
20. Ö. Gerçel, H.F. Gerçel, Preparation and Characterization of Activated Carbon from Vegetable Waste by Microwave-Assisted and Conventional Heating Methods, *Arab. J. Sci. Eng.* 41 (2016) 2385–2392. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1859-7>.
21. A. Ahmad, M.A. Gondal, M. Hassan, R. Iqbal, S. Ullah, A.S. Alzahrani, W.A. Memon, F. Mabood, S. Melhi, Preparation and Characterization of Physically Activated Carbon and Its Energetic Application for All-Solid-State Supercapacitors: A Case Study, *ACS Omega* 8 (2023) 21653–21663. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01065>.
22. A. Taurbekov, A. Abdisattar, M. Atamanov, M. Yeleuov, C. Daulbayev, K. Askaruly, B. Kaidar, Z. Mansurov, J. Castro-Gutierrez, A. Celzard, V. Fierro, T. Atamanova, Biomass Derived High Porous Carbon via CO₂ Activation for Supercapacitor Electrodes, *J. Compos. Sci.* 7 (2023) 444. <https://doi.org/10.3390/jcs7100444>.
23. R. Farma, Y. Tania, I. Apriyani, Conversion of hazelnut seed shell biomass into porous activated carbon with KOH and CO₂ activation for supercapacitors, *Mater. Today Proc.* 87 (2023) 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.099>.

СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОДНОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ЧАЙНОЙ БИОМАССЫ МЕТОДОМ
МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УСТРОЙСТВ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Ә. Н. Дүйсенбек^{1,2,3*}, Р. Е. Бейсенов^{2,3}, Қ. Асқарұлы^{1,3}, Е. Е. Бейсенова^{1,3}

¹ Satbayev University, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан

² Казахстанско-Британский технический университет, ул. Толе би, 59, Алматы, Казахстан

³ Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: aselka_star@mail.ru

Данная статья посвящена получению углеродного материала из отходов чая для систем накопления энергии и исследованию его свойств. Процесс синтеза осуществлялся методом микроволновой карбонизации и физической активацией в атмосфере CO₂. Морфологические и структурные характеристики образцов были определены с использованием методов сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и рамановской спектроскопии. Синтезированный активированный углерод отличался высокой пористостью и достаточной электропроводностью. По результатам рентгенофазового анализа наблюдались дифракционные пики (002) и (100), что свидетельствует о склонности полученного углеродного материала к образованию графитоподобной структуры. В спектре Рамана были зафиксированы пики D (≈ 1350 см⁻¹) и G (≈ 1580 см⁻¹), указывающие на наличие дефектов и графитовых доменов в структуре углерода. Отношение интенсивностей I_D/I_G составило 0,73, что свидетельствует о средней упорядоченности материала. Электрохимические характеристики активированного углерода, полученного из чайных отходов, были исследованы методами циклической вольтамперометрии, гальваностатического заряд-разряда и импедансной спектроскопии. Согласно результатам, при плотности тока 500 мА/г удельная емкость углерода достигла 116 Ф/г. Полученные данные подтверждают перспективность разработки углеродных материалов для суперконденсаторов и их потенциал в повышении эффективности устройств накопления энергии.

Ключевые слова: отходы чая, карбонизация, физическая активация, микроволны, устройства накопления энергии, суперконденсатор.

MICROWAVE SYNTHESIS OF ELECTRODE MATERIAL FROM TEA BIOMASS
FOR ENERGY STORAGE SYSTEMS

A. N. Duisenbek^{1,2,3*}, R. E. Beissenov^{2,3}, K. Askaruly^{1,3}, E. E. Beissenova^{1,3}

¹ KazNRTU named after K.I. Satbayev, 22 Satpayev str., Almaty, Kazakhstan

² Kazakh-British Technical University, 59 Tole bi str., Almaty, Kazakhstan

³ Institute of Combustion Problems, 172 Bogenbay Batyr Str., Almaty, Kazakhstan

* E-mail for contacts: aselka_star@mail.ru

This article focuses on the production of a carbon material from tea waste for energy storage systems and the investigation of its properties. The synthesis process was carried out via microwave carbonization followed by physical activation in a CO₂ atmosphere. The morphological and structural characteristics of the samples were determined using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and Raman spectroscopy. The synthesized activated carbon exhibited high porosity and appreciable electrical conductivity. XRD analysis revealed diffraction peaks at (002) and (100), indicating a tendency of the obtained carbon material to form a graphite-like structure. In the Raman spectrum, the D (≈ 1350 cm⁻¹) and G (≈ 1580 cm⁻¹) bands were observed, indicating the presence of defects and graphitic domains within the carbon structure. The intensity ratio I_D/I_G was 0.73, suggesting a relatively well-ordered structure. The electrochemical properties of the activated carbon derived from tea waste were investigated using cyclic voltammetry, galvanostatic charge-discharge cycling, and electrochemical impedance spectroscopy. According to the results, the specific capacitance of the carbon material reached up to 116 F/g at a current density of 500 mA/g. These findings confirm the promising potential of carbon materials derived from biomass for use in supercapacitors and their effectiveness in enhancing energy storage device performance.

Keywords: tea waste, carbonization, physical activation, microwave, energy storage devices, supercapacitor.