

Қазақстан қалаларындағы тұрмыстық қатты қалдықтардың құрамы мен қасиеттерін талдау

Еламан Айбульдинов¹, Тоғжан Машан^{2*}, Ляззат Кусепова², Руслан Сафаров², Аят Сабитов², Айнагүл Көлпек², Жанар Искакова¹

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты, Астана, Қазақстан; elaman@mail.ru; iskakova_zhb@enu.kz

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Астана, Қазақстан; mashan_tt@enu.kz; kusseпова_la@enu.kz; safarov_rz@enu.kz; kolpek_a@enu.kz; sabitov_as_1@enu.kz

*Корреспонденция: mashan_tt@enu.kz

Дәйексөз: Айбульдинов, Е., Машан, Т., Кусепова, Л., Сафаров, Р., Сабитов, А., Көлпек, А., Искакова, Ж. (2025). Қазақстанның әртүрлі қалаларындағы тұрмыстық қатты қалдықтардың құрамы мен қасиеттерін талдау. Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ-нің хабаршысы. Химия. География. Экология сериясы. 152(3), 11-41. <https://doi.org/10.32523/2616-6771-2025-152-3-11-41>

Академиялық редактор:
Э.Е. Копишев

Редакцияға түсті: 24.02.2025
Түзетілді: 26.02.2025
Қабылданды: 28.02.2025
Басылымға шықты: 30.09.2025



Copyright: ©2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Андатпа. Қазақстан Республикасы Ұлттық статистикалық бюросының деректері бойынша 2023 жылдың соңына қарай елімізде 3200-ден астам полигонда 120 миллион тоннаға жуық тұрмыстық қатты қалдықтар (ТҚҚ) жиналады. Жыл сайын шамамен 4,5 миллион тонна өндіріледі, оның тек 15 пайызы ғана қайта өңделеді. Сұрыпталмаған және сұрыпталған қалдықтардың жиналуы, ең алдымен, планетаның парниктік әсеріне әсер ету тұрғысынан көмірқышқыл газынан 28 есе қауіпті және 20 жыл ішінде 84 есе тиімдірек болатын парниктік газ – метанның түзілуіне байланысты маңызды экологиялық тәуекелдерді тудырады. Бұл зерттеудің мақсаты Қазақстанның алты қаласының: Астана, Алматы, Шымкент, Ақтөбе, Қарағанды және Өскемен қалаларының қатты тұрмыстық қалдықтарының физика-химиялық құрамын, сондай-ақ физикалық және термохимиялық қасиеттерін зерттеу болып табылады. Басқа зерттеулерден айырмашылығы, бұл зерттеуде қаралып жатқан қалалардың әртүрлі аудандарынан ондаған контейнерлердің толық босатылуын қамтитын жалғыз қалдық сынама қолданылды. Осылайша, қалалар бойынша қатты тұрмыстық қалдықтардың орташа құрамы сақталды. Барлық қалалардан алынған сұрыпталмаған және сұрыпталған қатты тұрмыстық қалдықтардың физика-химиялық құрамының талдауы жүргізіліп, ылғалдың жалпы және аналитикалық құрамы, күл мен ұшқыш заттардың құрамы, сонымен қатар жоғарғы және төменгі калориялық мәндері анықталды. Сұрыптау тиімділігі ТҚҚ өңдеудің бірінші кезеңі ретінде бағаланды. Қолмен сұрыптаудың тиімділік коэффициенті тәжірибеде 0,4–0,8 құрады. Алынған нәтижелер тұрмыстық қатты қалдықтарды тиімді басқару технологияларын бағалауға мүмкіндік береді және жартылай өнеркәсіптік пиролиз, жағу, плазмалық өңдеу және қордалау қондырғыларының тәжірибелік зерттеулерін жеңілдетеді.

Түйін сөздер: Қалдықсыз өндіріс; Қалдықтарды қайта өңдеу;

Тұрмыстық қалдықтар; Пиролиз; Энергия тиімді технологиялар; Синтездік газ; Жылу энергиясы; Метан; Көмірқышқыл газы; Парниктік газдар.

1. Кіріспе

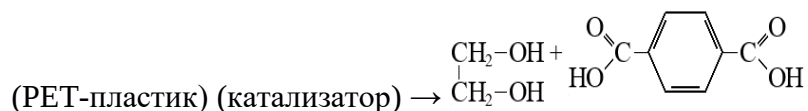
Қазақстан Республикасы Ұлттық статистикалық бюросының мәліметі бойынша, 2023 жылдың соңына қарай республика бойынша 3200-ден астам полигонда 120 миллион тоннаға жуық тұрмыстық қатты қалдықтар (ТҚҚ) жиналады (Serikova, A. және т.б., 2020). Жыл сайын шамамен 4,5 миллион тонна қалдық түзіледі, оның тек 15 пайызы ғана қайта өңделеді (Inglezakis, V.J. және т.б., 2018; Nukusheva, A. және т.б., 2023; Nukusheva, A. және т.б., 2023). Күн сайын миллиондаған адамдар тонналап қоқыс тастайды: қаптамалар, тамақ қалдықтары, пластик бөтелкелер, батареялар, қағаз, ескі киімдер. Мұның бәрі қазіргі заманғы қалалардың барлығы тап болатын тұрмыстық коммуналдық қалдықтар. Бір қарағанда, бұл жай ғана қоқыс, оны бір жерге тастау керек. Бірақ шын мәнінде қарапайым қоқыстың артында адам денсаулығына, табиғатқа, климатқа әсер ететін күрделі химиялық процестер жатыр. Сұрыпталмаған және сұрыпталған тұрмыстық қатты қалдықтардың үздіксіз жиналуы және сақталуы, оның ішінде метан (50–75%), көмірқышқыл газы (25–50%) және су буы, сондай-ақ азот оксидтері, күкіртсутек және органикалық заттар (шамамен 5–15%) сияқты парниктік газдар шығарындылары (World Meteorological Organization, 2024; Dharnaik, A.S. және т.б., 2024; Rodrigues, J.A.P. және т.б., 2024; Bhatt, K.P. және т.б., 2022; Chen, H. және т.б., 2024; Chen, B. және т.б., 2023; Abbas, R.I. және т.б., 2024; Cao, X. және т.б., 2023; Abis, M. және т.б., 2020; Dronia, W. және т.б., 2024; Zajac, M. және т.б., 2024) қоршаған ортаға айтарлықтай әсер етеді. Келесі ғасырда парниктік әсерге ықпал етуде көмірқышқыл газынан 28 есе және 20 жыл ішінде 84 есе тиімді болатын метан ерекше алаңдаушылық тудырады (Nukusheva, A. және т.б., 2023). Көмірқышқыл газы әртүрлі процестерге әсер ететін ұзақ атмосфералық өмір сүруіне байланысты ерекше қауіп тудырады. 1750 жылдан бастап атмосферадағы CO_2 концентрациясы шамамен 50%-ға өсті. Сонымен қатар, азот оксидтерінің парниктік потенциалы көмірқышқыл газынан 264 есе асып түседі және планетаның озон қабатына кері әсерін тигізеді (World Meteorological Organization, 2024).

Қоқыс контейнерге түскеннен кейін ол полигонға немесе қайта өңдеуге жіберіледі, немесе ең нашар жағдайда - үйіндіге жіберіледі. Міне, ең қызықтысы осы жерден басталады: қоқыс қоршаған ортамен және басқа заттармен химиялық реакцияларға түседі.

Көптеген елдерде қоқыстардың бір бөлігі өртеу зауыттарында жағылады. Бұл жағдайда тотығу реакциялары жүреді - жану:

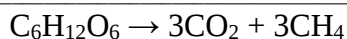
Құрамында көміртек бар заттар + $\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{жылу}$;

Бірақ қалдықтар толық жанбаса, улы қосылыстар түзіледі: көміртек оксиді (CO), күйе (C), диоксиндер. Пластмассаны жағу әсіресе қауіпті - бұл хлорсутек (HCl) және фуран қосылыстары сияқты улы газдарды шығаруы мүмкін. Пластмасса қалдықтардың ең проблемалы түрлерінің бірі болып табылады. Оның кейбір түрлерін химиялық реакциялар арқылы мономерлерге бөлуге болады - бұл химиялық рециклинг деп аталады.



Мұндай қайта өңдеу пластикті қайта пайдалануға, қоқыс көлемін азайтуға және қоршаған ортаның ластануын азайтуға көмектеседі.

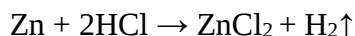
Полигондағы тамақ қалдықтары, қағаз, шөп және жапырақтар жай ғана «жоғалып» қоймайды – олар шіріп кетеді, яғни бактериялардың қатысуымен анаэробты ыдырау процесіне ұшырайды. Нәтижесінде келесі химиялық реакциялар жүреді:



Осылайша көмірқышқыл газы мен метан пайда болады - жаһандық жылынуды арттыратын парниктік газдар. Әсіресе метан қауіпті: ол климатқа көмірқышқыл газынан 25 есе көп әсер етеді.

Батареяларды, ескі тұрмыстық химиялық заттарды немесе бояуларды тастаған кезде біз қауіпті химиялық процестерді бастаймыз. Мысалы:

Металдар қышқылдармен әрекеттесіп сутегі түзеді, ол жарылуы мүмкін:



Тазалау өнімдеріндегі сілтілер мен қышқылдар жылу бөлінуімен бейтараптандыру реакцияларына түсуі мүмкін.

Ауыр металдар (сынап, қорғасын, кадмий) топырақ пен суға түсіп, экожүйені бұзады.

Тұрмыстық қатты қалдықтарды кәдеге жаратудың әртүрлі технологиялары бар:

- қордалау (Dharnaik, A.S. және т.б., 2024).
- пиролиз (Rodrigues, J.A.P. және т.б., 2024);
- плазмалық өңдеу (Bhatt, K.P. және т.б., 2022; Chen, H. және т.б., 2024);
- жағу (Chen, B. және т.б., 2023).

ТҚҚ компост жасау – қалдықтардың органикалық компоненттерінің биототығуының экзотермиялық процесі болып табылатын анаэробты микроорганизмдер көмегімен биологиялық өндеуді қамтитын әдіс. Экзотермиялық биологиялық тотығу процесі арқылы қол жеткізіледі, онда органикалық субстрат микроорганизмдердің аралас популяциясының аэробты биологиялық ыдырауына ұшырайды, бұл ылғалды жағдайда температураның жоғарылауына әкеледі. Бұл технологияны қолдану арқылы 50%-ға дейін биологиялық тыңайтқыштарды (компост), сондай-ақ әртүрлі газдардың шамамен 50%-ын (мысалы, биогаз және көмірқышқыл газы) және 10%-ға дейін басқа жанама өнімдерді шығаруға болады.

Компосттың екі түрі бар: аэробты компосттау (Abbas, R.I. және т.б., 2024) және қатты қалдықтарды өнеркәсіптік қордалау (Сао, Х. және т.б., 2023).

Аэробты компосттау кезінде анаэробты бактериялар көбейеді, өйткені ыдырау қалдықтардың тереңірек қабаттарында жүреді, жылу энергиясын өндіретін ашытумен бірге жүреді (Abbas, R.I. және т.б., 2024). Нәтижесінде жәндіктердің жұмыртқалары, гельминттердің жұмыртқалары мен дернәсілдері, сондай-ақ патогендік микроорганизмдер 50-ден 70 °C-қа дейінгі температураның әсерінен жойылады. Қатты қалдықтардың ыдырауы көмірқышқыл газы мен су буының бөлінуіне әкеледі.

Әдістің кемшіліктері: оларды кәдеге жаратпастан парниктік газдардың белсенді шығарындылары. Қатты қалдықтарды өнеркәсіптік қордалау 1930 жылдардан бастап дамып келеді (Сао, Х. және т.б., 2023). Ол Дания, Австрия, Германия, Бельгия және Нидерланд сияқты ЕО елдерінде танымал болды Abis, M. және т.б., 2020, мұнда барлығы 400-ге жуық қоқыс өңдейтін зауыт бар.

Орталықтандырылған қорданы үш бөлек технологияға бөлуге болады:

- Танаптағы үйінділерде (Dronia, W. және т.б., 2024);
- Статикалық стекте (Zajac, M. және т.б., 2024);
- Көлденең реакторда (Sobieraj, K. және т.б., 2021).

Үйінділермен қордалау (орамдық үйінділер) қалдықтардың ауаға орналастырылып, арнайы машиналармен жүйелі түрде аударылуын білдіреді. Биіктігі 3 м-ге дейін, ені 3-тен 6 м-ге дейін және ұзындығы бірнеше жүз метрге дейін үйінді жасалады. Органикалық заттардың тотығуы ауа мен оттегі еркін айналатын 1 м тереңдікте жүреді.

Әдістің кемшіліктері:

- қорданың қалыптасу кезеңі 4 айдан 6 айға дейін немесе одан да көп;

- қорда жасау үшін үлкен аумақ қажет;
- жағымсыз иістің таралуы, фильтраттың төгілуі және т.б.

ТҚҚ пиролизі – оттегінің жетіспеушілігі немесе жеткіліксіз мөлшері кезінде қалдықтардың органикалық бөлігінің термиялық ыдырауы, нәтижесінде пиролиз газы мен қатты көміртегі қалдықтары түзіледі (Du, Y. және т.б., 2021)

Пиролиз өнімдерінің мөлшері мен құрамы қалдықтардың құрамына және ыдырау температурасына байланысты. Қалдықтарды жағудың орнына пиролизді қолдану газ шығарындыларының көлемін және олардағы улы компоненттердің құрамын күрт төмендетуге мүмкіндік береді.

Пиролиз температура немесе қыздыру жылдамдығы сияқты жұмыс параметрлерін реттеу арқылы әртүрлі пропорцияларда қатты, сұйық және газ тәрізді өнімдердің комбинациясын өндіруге жан-жақты мүмкіндік береді. Қалдықтардың термиялық ыдырауы шайырдың түзілуін барынша азайтатын немесе толығымен жоятындай етіп жүзеге асырылуы мүмкін немесе қажетті соңғы өнімдердің бірі ретінде шайыр алу үшін оңтайландырылған болуы мүмкін (Xu, M.-X. және т.б., 2021). Пиролиз қондырғылары процесс жүретін жылу жағдайларына байланысты жіктеледі (Chatterjee, R. және т.б., 2021)

- төмен температуралы (450–500⁰C), газдың минималды шығуымен, шайырлардың, майлардың және қатты қалдықтардың максималды мөлшерімен сипатталады (Nobre, C. және т.б., 2021);

- орташа температура (800⁰C дейін), шайырлар мен майлардың азайған мөлшерімен газ өнімділігінің жоғарылауымен сипатталады;

- жоғары температура (800⁰C жоғары), газдың максималды шығуымен және шайырлардың ең аз мөлшерімен сипатталады (Chen, T. және т.б., 2021).

Пиролизді қолдану арқылы ТҚҚ қайта өңдеу технологиялары өте экологиялық таза болып келеді.

Плазмалық қалдықтарды тазарту қондырғысының жұмыс принципі оттекті оқшаулау, оңтайлы қысым жасау және қалдықтарды төмен температуралы плазма ағынымен өңдеу кезінде қалдықтарды кем дегенде 1200⁰C өте жоғары температураға ұшырату болып табылады (Park, D.K. және т.б., 2021). Температуралық шарттарды қатаң сақтау қайта өңдеу кезінде синтез газында сұйық фракцияның, сондай-ақ төмен температурада қалдықтарды өңдеу кезінде пайда болатын шайырлардың пайда болуын болдырмауға көмектеседі. Сонымен қатар, өте жоғары температураны пайдалану улы немесе тұрақты қалдық компоненттердің толық ыдырауына мүмкіндік береді және ерекше қауіпті заттардың түзілуіне жол бермейді (Gonçalves, M.F.S. және т.б., 2022).

Плазмалық газдандыру қондырғысының жұмыс принципін келесідей сипаттауға болады (Bhatt, K.P. және т.б., 2022; Chen, H. және т.б., 2024):

- Қалдықтар тиеу шахтасына салынады. Салыну процесі қалдықтардың түсу жылдамдығы мен көлемі бақыланатын жабық сақтау құлпы арқылы жүзеге асырылады.

- Ауа мен су буы реакторға беріледі, онда қоспа кейін төмен температуралы плазма ағынымен өңделеді.

- Синтез-газ реактор камерасының түбінен үздіксіз беріледі.

- Алынған синтез-газ жану үшін газ қазандығына немесе салқындату үшін салқындатқышқа берілуі мүмкін, содан кейін тазалау және сүзу орындалады.

- Тазалаудан кейін синтез-газ компрессорға беріледі, онда ылғал жойылады, сүзіледі, содан кейін газ турбинасына беріледі.

- Қалған күл және кейбір жанбайтын материалдар су ыдысының түбіне шөгеді, онда шлактарды алып тастамас бұрын салқындатылады.

Плазманы газдандыру қондырғысының үздіксіз жұмысын қамтамасыз ету үшін плазмалық ағынды үнемі күтіп ұстау, ауа-бу қоспасын мезгіл-мезгіл беру және оның синтез-газға айналуы кезінде реактордағы қалдықтардың деңгейін бақылау қажет.

Плазманы қайта өңдеудің артықшылықтары:

- Қайта өңдеу өте жоғары – 1200°C жоғары температурада жүзеге асырылады, соның арқасында органикалық және бейорганикалық қалдықтар атмосфераға улы қауіпті диоксиндер мен фурандар шығармай ыдырайды. Қауіпті заттардың шығарындылары плазмалық ағындардың әрекеті және реакторлардың арнайы конструкциясы есебінен барынша азайтылады.

- Қайта өңдеу процесінде шаймалау болмайды, өйткені қалдықтар реакторға түсер алдында кептіріліп, ұсақталады.

- Қалдықтарды плазмалық қайта өңдеу қалдықтарды сақтауды қажет етпейтін жабық процесс. Келіп түскен қалдықтар дереу қайта өңдеуге жіберіледі және өңдеуді күткенше сақталмайды.

- Қалдықтарды плазмалық қайта өңдеу екі есе пайда әкеледі, өйткені қалдықтар қауіпсіз жойылады, ал алынған энергия тек станцияның жұмысына ғана емес, сонымен қатар тұрғындардың қажеттіліктеріне де жұмсалады.

- Қайта өңдеу нәтижесінде қалдықтардан қатты қалдық алынады. Алынған шлак көлемі қалдықтардың бастапқы көлемінің шамамен оннан бір бөлігін құрайды.

Плазмалық өңдеудің кемшіліктері:

- Қатты қалдықтар арнайы жолмен жойылуға ұшырайды.

- Плазма генераторының жұмысы жоғары энергия шығындарын талап етеді.

- Бұл әдісті қолдану екінші реттік шикізат ретінде пайдалануға болатын қалдықтар санатын толығымен жоюға әкеп соғады.

- Жабдықты сатып алу және пайдалану шығындары қалдықтарды жоюдың басқа әдістеріне қарағанда жоғары, сондықтан өтелу мерзімі ұзағырақ.

Тұрмыстық қатты қалдықтарды жағу технологиясы келесі кезеңдерді қамтиды (Chen, B. және т.б., 2023; Sikder, S. және т.б., 2024):

- Екіншілік шикізат ретінде пайдалануға болатын компоненттерді оқшаулау мақсатында қалдықтарды сұрыптау; жағуға болмайтын компоненттерді (металл, аккумуляторлар және т.б.), сондай-ақ жағуға тыйым салынған компоненттерді (пластик, құрамында сынап бар және т.б.) бөлу (Wikira, N. және т.б., 2024).

- Қатты қалдықтарды төмен температурада алдын ала өңдеу (Kuo, W.-C. және т.б., 2019).

- Электр энергиясын өндіру мақсатында сұрыпталған тұрмыстық қатты қалдықтарды жағу (Traven, L., 2023).

Қазақстан Республикасының ғалымдары сұрыпталған тұрмыстық қатты қалдықтарды жағу кезінде пайда болатын газ тәрізді, сұйық және қатты қалдықтарды толық пайдаланудың технологиялары мен шешімдерін әзірледі. Бұл жаңашылдық қатты тұрмыстық қалдықтарды кәдеге жаратуға қалдықсыз тәсілдің пайда болуына әкелді.

Тиісті кәдеге жарату технологиясын анықтау үшін қатты тұрмыстық қалдықтардың құрамы мен сипаттамалары туралы ақпарат қажет. Қазақстан Республикасында әр қалада басқа қалалардағы қалдықтардың құрамынан ерекшеленетін өзіндік бірегей орташа қалдықтар құрамы бар. Зерттеудің мақсаты – Қазақстанның алты қаласынан: Астана, Алматы, Шымкент, Ақтөбе, Қарағанды және Өскемен қалаларының тұрмыстық қатты қалдықтарының физика-химиялық құрамын, физикалық және жылулық қасиеттерін талдау.

Қолданыстағы зерттеулерден айырмашылығы, бұл зерттеуде қаралып жатқан қалалардың әртүрлі аудандарынан ондаған контейнерлерді толығымен босатуды қамтитын жалғыз қалдық үлгісі пайдаланылады.

Осылайша, қала бойынша қатты тұрмыстық қалдықтардың орташа құрамы сақталды. 2021 жылы қабылданған Қазақстан Республикасының Экологиялық кодексіне сәйкес ТҚҚ-ның кейбір құрамдас бөліктері энергияны кәдеге жаратуға жатпайды (The Law of the Republic of Kazakhstan, 2023):

- сұйық қалдықтар (Karunasena, G. және т.б., 2024);

- жарылғыш, коррозиялық, тотықтырғыш, тұтанғыш немесе жанғыш қауіпті қалдықтар (Pech-Rodríguez, W.J. және т.б., 2024);
- құрамында тұрақты органикалық ластағыштар бар қалдықтар (Bułkowska, K. және т.б., 2024);
- құрамында сынап бар шамдар мен құрылғылар (Chalkidis, A. және т.б., 2020);
- электронды және электр жабдықтары (Torrubia, J. және т.б., 2024);
- түсті және қара металдардың сынықтары (Long, Y. және т.б., 2024);
- литий батареялары, қорғасын-қышқылды аккумуляторлар (Yanamandra, K. және т.б., 2022);
- құрылыс материалдарының қалдықтары (Patil, Y.R. және т.б., 2024).

Барлық тізімделген материалдарды лицензиясы бар кәсіпорындар арнайы бекітілген технологияларды пайдалана отырып жоюы керек.

Қазіргі уақытта қоқыс жинайтын контейнерлерде сақталған аралас қалдықтарға тұрғындар жауап бермейді, нәтижесінде барлық қатты тұрмыстық қалдықтар сұрыптау пунктіне бірге келіп түседі. Электр шамдары, құрылғылар, батареялар және құрылыс қалдықтары сияқты заттарды қатты қоқыс контейнерлеріне тастауға болмайды, дегенмен адамдар бұл тыйым салынған материалдарды кейде контейнерлерге тастайды.

Екінші жағынан, қолданыстағы қатты қалдықтарды сұрыптау зауыттарында сұрыптау көрсеткіші шамамен 12% құрайды, ал талап етілетін минимум шамамен 40% құрайды. Басқаша айтқанда, кәдеге жаратуға арналған тіпті сұрыпталған қатты қалдықтардың құрамын дәл қазір болжау мүмкін емес.

Қалдықтарды жинау тек ірі елді мекендерде ғана жүргізілсе, ауылдық жерлерде мұндай қызмет жиі жетіспейді. Оның үстіне барлық қалаларда сұрыптау зауыттары жоқ.

Алынған нәтижелер қатты тұрмыстық қалдықтарды тиімді кәдеге жарату технологияларын талдауға, сондай-ақ жартылай өнеркәсіптік пиролиз, өртеу, плазмалық өңдеу және кордалау бойынша тәжірибелік зерттеулер жүргізуге мүмкіндік береді.

2. Материалдар мен әдістер

Тұрмыстық қатты қалдықтарды жинау қызметімен қамтылған Қазақстан Республикасы халқының үлесі 45,3%-дан - 96% - ға дейін және тұрмыстық қатты қалдықтарды қайта өңдеу үлесі 0,23 %-дан 44,33% - ға дейін өскен. (Glazyrin S.A. және т.б., 2024).

ТҚҚ-дың физика-химиялық құрамын бағалау қала немесе аймақ үшін қалдықтарды басқару стратегиясын әзірлеуден бұрын болуы керек. Қалдықтардың құрамы туралы нақты және сенімді деректер оның ресурстық (материалдық және энергетикалық) әлеуетін бағалау және қайта өңдеу немесе кәдеге жаратудың нақты технологияларын енгізуді негіздеу үшін қажет. Атап айтқанда, жеке құрамдастардың болуын түсіну қалдықтарды сұрыптау, компосттау немесе жағудың экологиялық және экономикалық тиімділігін болжауға мүмкіндік береді (The Law of the Republic of Kazakhstan, 2024).

ТҚҚ-дан алынатын шикізат пен энергияны қайталама өңдеуді жоспарлау стратегиялары олардың құрамы мен қасиеттері туралы жан-жақты мәліметтерге негізделуі керек. Сондықтан қалдықтардың сандық және сапалық сипаттамаларын зерттеудің маңызы зор (Li, J. және т.б., 2024).

Қалдықтардың физика-химиялық құрамын зерттеу қатты қалдықтардың жылулық қасиеттерін бағалау үшін пайдаланылуы мүмкін, бұл олардың энергетикалық әлеуетін және термиялық өңдеу әдістерінің қалпына келтіру және кәдеге жарату үшін жарамдылығын, сондай-ақ қайталама отын алу мүмкіндігін бағалау үшін қажет (Bhatt, A.K. және т.б., 2024). Осыған байланысты қатты қалдықтардың физикалық-химиялық құрамы бойынша жылулық қасиеттерін есептеудің адекватты әдістерінің өзектілігі артады. Тұрмыстық қатты қалдықтардың негізгі жылулық қасиеттеріне ылғалдылық, күлділік және жылулық құндылық жатады.

Қалдықтардың құрамындағы барлық ылғал сыртқы және гигроскопиялық болып бөлінеді (Qi, Y.-P. және т.б., 2022). Сыртқы ылғал – ауа-құрғақ күйге дейін кептіру кезінде заттың жоғалтқан ылғалдылығы. Ауада кептірілген қалдықтар әдетте салмағын бөлме температурасында (шамамен 15–20°C) және қалыпты салыстырмалы ылғалдылықта (50%) өзгермейтін қалдықтар болып саналады. Гигроскопиялық ылғал – 105°C температурада кептіру кезінде ауада кептірілген заттың жоғалтқан ылғалдылығы. Бұл бөлшектермен мықтап ұсталатын су буы.

Сыртқы ылғалды өлшеу арнайы кептіру шкафтарын пайдалануды және ұзақ уақыт бойы (5–8 күн) үлкен үлгілерді талдауды қажет ететін еңбекті көп қажет ететін процесс. Нәтижесінде қалдықтардың жалпы ылғалдылығы әдетте бағаланады. Жалпы ылғалдылық қалдық үлгісінің бастапқы массасы мен құрғақ үлгі массасы арасындағы айырмашылықтың қалдық үлгісінің бастапқы массасына қатынасы ретінде есептеледі. Қоршаған орта ылғалдылығының жалпы ылғалдылыққа қатынасы әдетте 0,8-ден 0,9-ға дейінгі диапазонда, орташа мәні шамамен 0,85 (Li, J. және т.б., 2024).

Қалдықтардың ылғалдылығына ауаның ылғалдылығы, жауын-шашын және пайдаланылатын жинау жүйесі, сондай-ақ қалдықтардың физикалық-химиялық құрамы сияқты әртүрлі факторлар әсер етеді. Азық-түлік қалдықтары сияқты ТҚҚ-ның кейбір құрамдас бөліктерінің ылғалдылығы жоғары болуы мүмкін (60-70%), ал шыны және ПЭТ бөтелкелер сияқты басқа материалдардың ылғалдылығын шамалы деп санауға болады (Li, J. және т.б., 2024).

Күлдің құрамы әдетте отынның толық жануы кезінде минералды қоспалардан түзілетін жанбайтын (сусыз) қалдық пайызы ретінде анықталады. Күлдің құрамы биомассаның пиролизіне тікелей әсер етеді (Puri, L. және т.б., 2024). Зертханалық жағдайларда ТҚҚ-ның күлділігі құрғақ қалдықтар үлгісін жағу кезіндегі бастапқы ТҚҚ мен күл қалдығының массасының айырмашылығымен гравиметриялық жолмен анықталады. Жылулық құндылық заттың толық жануы кезінде бөлінетін жылудың жалпы мөлшері, оның ішінде жану өнімдерін салқындату кезінде су буының конденсация жылуы болып табылатын жалпы жылулық құндылық (GKV) бойынша өлшенеді. Немесе оны таза жылулық құндылық (NKV) деп те атауға болады, ол су буының конденсация жылуын есептемегенде толық жану кезінде бөлінетін жылу болып табылады (Ratomski, P. және т.б., 2023).

Жоғары жылулық мәні Q_{GCV} және төменгі жылулық құндылығы Q_{LCV} (кДж/кг) келесі қатынаспен байланысты

$$Q_{LCV} = Q_{GCV} - 25,1 \cdot (9H + W) \quad (1)$$

мұндағы $25,1 \cdot (9H + W)$ – жанғыш заттың сутегі H (кг/кг) жануы кезінде түзілетін заттың ылғалдылығы W (кг/кг) булануға жұмсалған жылу, кДж/кг. Ылғалдылық W және сутегі H мәндерін 1-кестеден табуға болады.

Жоғары жылу құндылығын анықтаудың тәжірибелік әдісі калориметриялық бомбадағы қалдық массаның толық жануына негізделген. Төменгі жылу мөлшері (1) формуласы бойынша қайта есептеледі. Дегенмен, бұл үшін салмағы бірнеше грамм болатын ТҚҚ зертханалық сынамасын дайындау қажет, ол құрамы бойынша барлық ТҚҚ үшін репрезентативті болуы керек. Осыған байланысты ылғалға, күлділікке және жекелеген компоненттердің жылулық құндылығына негізделген жылу құндылығын жанама бағалаудың әртүрлі тәсілдері әзірленді.

Қатты қалдықтардың элементтік құрамы туралы деректер болмаған жағдайда жеке құрамдас бөліктердің массалық формулалары туралы деректер пайдаланылады.

Бүкілресейлік жылу техникалық институты («ВТИ» АҚ) тұрмыстық қатты қалдықтардың негізгі жылулық сипаттамаларын эксперименталды түрде анықтау әдісін әзірледі (Li, J. және т.б., 2024). Әдіс компоненттердің топтарын (қағаз, тоқыма, пластмасса, металдар, басқа бейорганикалық материалдар және тамақ қалдықтары сияқты)

анықтауды және олардың жалпы қалдық ағынындағы массалық үлесін анықтауды қамтиды. Содан кейін зертханалық жағдайда ылғалдылық пен күлділік әр топтың құрғақ массасы бойынша өлшенеді және әр топ үшін жанудың жалпы меншікті жылуы есептеледі (кесте 1).

ТҚҚ құрамының құрамдас бөліктерінің кеңейтілген тізімі әрбір компоненттің жану жылуын дәлірек анықтауға мүмкіндік береді. Компоненттердің кеңейтілген тізімінің қасиеттері туралы анықтамалық деректер негізінде алынған нәтижелер жоғарғы жану жылуын береді (12100 кДж/кг) (Soares, C., 2015). Бұл сәйкессіздікті жеке құрамдас бөліктердің жану жылу мәндерін асыра бағалаумен және олардың ылғалдылығын төмен бағалаумен түсіндіруге болады.

Кесте 1. ТҚҚ құрамындағы жеке элементтердің концентрациясы (Nasrullah, M. және т.б., 2015; Williams, P.T., 2005; Young, G.C., 2010)

ТҚҚ құрамдас атауы	Ылғалдылық, %	Жол массасына шаққандағы күл мөлшері, %	Құрғақ, күлсіз (жанғыш) массаға негізделген элементтік құрамы, %					Төменгі калориялық құндылығы Q_{LCV} , кДж/кг
			C	H	O	N	S	
Қағаз	6,0/24	6,0/4,8	40,7/32,8	5,6/4,6	41,2/33,4	0,3/0,3	0,2/0,1	22,4/13,5
Пластмасса	2,0/13,3	10,0/4,7	58,7/67,5	7,0/10,2	22,3/3,9	0/0,2	0/0,2	27,8/33,4
Тамақ қалдықтары	70,0/65,4	5,0/3,8	12,6/15,8	1,7/2,4	9,9/11,3	0,7/1,2	0,1/0,1	3,1/7,3
Тоқыма	10,0/12,4	2,5/5,9	49,4/44,9	5,9/5,7	28,0/27,9	4,1/2,9	0,1/0,3	23,5/20,4
Ағаш	20,0/14,8	1,5/2,4	39,5/39,9	4,7/5,1	34,1/37,1	0,2/0,6	0,1/0,1	19,8/16,8
Резеңке	2,0	10,0	86,2	1,1	0	0,2	0,5	29,9
Былғары	10,0	10,0	53,4	7,1	10,3	8,9	0,4	23,4
Бір рет қолданылатын жаялықтар	66,9	1,4	16,1	2,5	12,9	0,2	0,1	7,5
Инертті материалдар	0	100	0	0	0	0	0	0
Жұқа фракция (скринингтер)	33,0/41,1	34,2/15,0	19,0/22,1	2,4/3,1	10,1/17,5	0,6/0,9	0,7/0,3	7,3/9,6
Қатты отын қалдықтары (ТҚҚ)	15/7,3	8,4/14,0	45,5/43,7	6,4/5,8	24,0/28,5	0,5/0,5	0,2/0,2	20,2/18,7

Екінші жағынан, бұл есептеулер сонымен қатар «дәстүрлі» калориялық фракцияларға (мысалы, макулатура мен полимерлер) қоса, калориялық құндылық бойынша маңызды емес құрамдастардың үлесін (мысалы, аралас орау, мысалы, Tetra Pak жөргектері және т.б.) ескереді. Осы құрамдас бөліктер бірігіп, ТҚҚ-ның жалпы жылулық құндылығын 10-15%-ға жалпы арттыруға ықпал етеді. Осылайша, ТҚҚ жылу қасиеттерін есептеу арқылы бағалау әртүрлі нәтижелер бере алатын әртүрлі әдістерді қолдану арқылы жүзеге асырылуы мүмкін. Бұл жағдайда орындалған есептеулер жеткілікті сенімді болуы үшін мүмкін болатын қателер мен дәлсіздіктерді, сондай-ақ олардың пайда болу себептерін сыни тұрғыдан бағалау қажет. Орындалған есептеулер калориялық құндылықты бағалау кезінде негізгі кіріс деректері жеке құрамдастардың, оның ішінде мазмұны мен жылулық құндылығы бойынша маңыздылары ғана емес, сонымен қатар

салыстырмалы түрде аз мөлшерде қамтылған басқалары туралы ақпарат болып табылатынын растайды. Отынның физика-химиялық құрамын әр түрлі массалар түрінде анықтауға болады: дымқыл массалық компоненттер (г), аналитикалық массалық компоненттер (а), құрғақ массалық компоненттер (d), құрғақ күлсіз (жанғыш) массалық компоненттер (daf) және органикалық массалық компоненттер (o) (кесте 2).

Кесте 2. Отынның физика-химиялық құрамы

Белгілеу	Көміртек, С	Сутек, Н	Оттек, О	Азот, N	Органикалық күкірт, S _{орг}	Пиритті күкірт, S _{пир}	Гидратациялық ылғалдылығы, W _{гид}	Балласт		
								Күл, А	Ылғалдылық, W	
									Талдаулық ылғалдылық, W _{ан}	Сыртқы ылғалдылық, W _{ex}
o	Органикалық масса									
d af	Құрғақ күлсіз (жанғыш) массалық компоненттер									
d	Құрғақ массалық компоненттер									
a	Аналитикалық массалық компоненттер									
г	Дымқыл массалық компоненттер									

Күлдің құрамын анықтау. Алдымен бос фарфор тигельдері муфельді пеште (550±10)°C температурада 60 мин ұсталды. Тигельдердің массасы аналитикалық таразыда (таразыларда) тигельдерді бөлме температурасына дейін салқындатқаннан кейін 0,1 мг дәлдікпен өлшенді. Әрі қарай барлық салмақ өлшеулері ұқсас әдіспен жүргізілді. Содан кейін тигельдерге ТҚҚ салмағы 1±0,01 г болатын мөлшері салынды. Осыдан кейін сынамасы бар бұл тигельдер салқын пешке қойылды. Пеш өз ішіндегі кеңістікті (250±10)°C температураға дейін қыздырды. Ұшатын заттарды шығару үшін бұл температура пештің ішінде 60 минут бойы ұсталды. Процедура (550±10)°C температурада 120 минут бойы қайталанды. Кептіру және салқындағаннан кейін тигельдер өлшенеді. Құрғақ күйдегі (d) күлдің мөлшері (A^d) мына формуламен есептелді:

$$A^d = \frac{m_k - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - W^a} \% \quad (2)$$

m_k – күл қалдығы бар тигельдің массасы, кг;

m₁ – бос тигельдің массасы, кг;

m₂ – сынамамен бірге тигельдің массасы, кг;

W^a – аналитикалық үлгідегі ылғалдың массалық үлесі, %.

Ұшқыш органикалық қосылыстардың шығымын анықтау. Муфельді пеш (900±5)°C температураға дейін алдын ала қыздырылады. Бос тигельдер пеште 7 мин ұсталады. Содан кейін тигельдер пештен шығарылады, салқындатылады және өлшенеді. Массасы 1±0,01 г аналитикалық үлгі тигельге таратылып орналастырылады. Үлгіні пеште 900°C температурада 7 минут ұстайды. Салқындағаннан кейін ұшпайтын қалдықтары бар тигельдер жабылады және аналитикалық таразыда өлшенеді. Ұшқыш органикалық қосылыстардың V^a шығымы мына формула бойынша есептеледі:

$$V^a = \frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - W^a [\%] \quad (3)$$

m_1 – қақпағы бар бос тигельдің массасы, кг;

m_2 – қақпағы бар тигельдің және күйдірілгенге дейінгі сынаманың массасы, кг;

m_3 – күйдірілгеннен кейінгі қақпағы бар тигельдің және ұшпайтын қалдықтың массасы, кг;

W^a – аналитикалық үлгідегі ылғалдың массалық үлесі, %.

Жалпы ылғалдылықты анықтау. Бос тигель өлшенді. Салмағы $1 \pm 0,01$ г үлгіні өлшейтін тигельге салып, өлшеп, кептіру пешінде $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ температурада 60 минут бойы қыздырылды. Содан кейін өлшенетін тигель ылғалды сіңірмеу үшін 10-15 с ыстық күйде өлшенді. Жалпы ылғалдың массалық үлесі отын компоненттерінің орташа мөлшері үшін мына формула бойынша есептеледі:

$$W_t^r = \frac{(m_2 - m_3) + m_4}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

m_1 – бос тигельдің массасы, кг;

m_2 – сынамамен бірге кептіруге дейінгі тигель массасы, кг;

m_3 – кептіруден кейінгі үлгімен бірге тигельдің массасы, кг;

m_4 – қаптамадан жиналған ылғалдың массасы, кг.

Морфологиялық құрамын анықтау. ТҚҚ бастапқы үлгісі ауа температурасы $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ және салыстырмалы ылғалдылығы 80% аспайтын бөлмеде картон қағазға жұқа қабатқа орналастырылды. 18,63 кг үлгінің жалпы массасы зертханалық таразы арқылы анықталды. Үлгі оның құрамдас бөліктеріне қысқыштар арқылы бөлінді. Әрбір жеке құрамдас бөлек науаға орналастырылды. Морфологиялық құрамы ± 10 мг дәлдікпен дәл зертханалық таразыларды пайдаланып гравиметриялық жолмен өлшенді. Үлгінің жалпы массасы оның құрамдас бөліктеріне: қағаз (картон), тоқыма (шүберек бұйымдары), пластмасса, органикалық қалдықтар, керамика, металл, резеңке, ағашқа бөлінді. Үлгінің әрбір құрамдас бөлігінің мазмұны үлгінің жалпы массасының пайызы ретінде мына формула бойынша анықталды:

$$X^i = \frac{m_{\text{компонент}}}{m_{\text{жалпы}}} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

$m_{\text{компонент}}$ – сынама компонентінің массасы, кг;

$m_{\text{жалпы}}$ – сынаманың жалпы массасы, кг.

Жану жылуының мәнін анықтау. Зертханалық тәжірибе бірнеше кезеңнен тұрады: 1. үлгіні жануға дайындау; 2. үлгіні жағу; 3. қоршаған ортаның әсерін барынша азайтуды ескере отырып нәтижелерді бағалау. Кезеңдерді толығырақ қарастырайық. Алдын ала ұсақталған үлгі эксикаторда кептірілген және салмағы $1 \pm 0,01$ г үлгіге престелді (1-сурет). Үлгі калориметриялық бомбаға салынып, жандырылды.

Зерттеу үшін келесі құрал-жабдықтар пайдаланылды:

- максималды салмақ шегі 2200 г, рұқсаты 0,01 г, орнатылған калибрлеу массасы, пайыздық өлшеу режимдері, АСАІ функциясы бар өнім бөліктерінің санын санау, компаратор, статистикалық есептеу функциясы, сондай-ақ материалдың магниттік тығыздығын өлшеу мүмкіндігі бар жоғары дәлдіктегі зертханалық таразылар 2200 г, рұқсат ету мүмкіндігі. ілмек. Қазақстан Республикасында өндірілген;

- 2,0 дәлдік класы бар G-2-210 салмақтары. Жинаққа кіретін салмақтардың номиналды мәндері 1 г, 2 г, 5 г, 10 г, 20 г, 50 г және 100 г болды. Материал - көміртекті болат. Коррозияға қарсы жабын - хром. Қазақстан Республикасында өндірілген;

- АБК-1 бомбасының калориметрі, редукторы бар оттегі баллоны, манометрі және желдеткіші бар, компьютерді қосуға арналған шығысы бар, көмір, кокс, шикі мұнай, дизельдік отын, керосин, бензин және табиғи газ сияқты қатты, сұйық және газ тәрізді отындардың жану жылуын өлшеуге арналған. Қазақстан Республикасында жасалған.

Жиналған екіншілік шикізаттың пайызымен сипатталатын қалдықтарды бөлек жинау тиімділігінің объективті шегі қалдықтардағы пайдалы құрамдастардың нақты мөлшері болып табылады: тіпті қалдықтарды бөлек жинаудың ең тиімді жүйесі де нақты түзілгеннен артық қайталама шикізатты алуға мүмкіндік бермейді.



Сурет 1. Қысыммен престелген үлгілер

Қалдықтарды бөлек жинауды енгізу кезінде қайталама ресурстар мен қалдықтардың күтілетін ағындарын түсіну ерекше маңызды, себебі:

- алынатын қайталама ресурстардың көлемі мен сапасы қайталама шикізат нарығындағы нақты сұранысқа сәйкес болуы керек;

- бөлек жинауды техникалық ұйымдастыру кезінде қажетті ыдыстардың саны мен түрлерін, қалдықтарды шығару жиілігін, қажетті құрал-жабдықтар мен жұмыс күшінің мөлшерін, сондай-ақ қалдықтарды сұрыптау желісінің күтілетін өнімділігін және басқа факторларды анықтау қажет;

- экономикалық тиімділік көрсеткіштері (шығындық бағасы, рентабельділік және т.б.) алуға болатын қайталама шикізаттың көлемі мен сапасына тікелей байланысты.

Қалдықтарды бөлек жинауды енгізу арқылы қол жеткізуге болатын қайталама шикізат ағындарының сандық және сапалық көрсеткіштерін жекелеген ағындардың көлемдерін және олардың физикалық-химиялық құрамын зерттеу негізінде бағалауға болады.

Қалдықтарды басқарудың заманауи концепциялары әдетте ТҚҚ құрайтын компоненттердің ресурстық әлеуетін барынша пайдалануға бағытталған. Бұл ретте өндеуге қабылданған қалдықтардың құрамы сұрыптау зауыттарында қайталама шикізатты іріктеу дәрежесіне әсер етеді, термиялық өндеу әдістерін қолдану кезінде қалдықтардың жылулық құндылығын және биотехнологияны қолдану кезінде ыдырау процестерінің тиімділігін анықтайды және нәтижесінде белгілі бір технологияның техникалық-экономикалық көрсеткіштеріне әсер етеді.

3. Нәтижелер

Сұрыпталмаған қалдықтар мен ТҚҚ-дың физикалық-химиялық құрамын сұрыптаудан кейінгі зерттеу Астана, Алматы, Қарағанды, Ақтөбе, Шымкент және Өскемен қалалары үшін келесі тәжірибелік мәліметтерді берді (кестелер 3-15).

Кесте 3. Астана қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылған, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрам, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
Органикалық қалдықтар	40,10	34,09	6,02	24,86	3340,0	1339,34
Пластмасса	15,80	10,27	5,53	22,86	24393,76	3854,21
Қағаз/картон	16,40	10,66	5,74	23,72	9705,97	1591,78
Жаялықтар	6,20	6,20	0,00	0,00	12000,00	744,00
Шыны	5,80	5,80	0,00	0,00	0,00	0,00
Тоқыма және былғары	3,65	0,00	3,65	15,09	17999,41	656,98
Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	6,10	6,10	0,00	0,00	7000,00	427,00
Керамика және құрылыс қалдықтары	2,80	0,84	1,96	8,10	0,00	0,00
Металл	1,80	0,90	0,90	3,72	0,00	0,00
Ағаш	0,80	0,40	0,40	1,65	14507,88	116,06
Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары	0,55	0,55	0,00	0,00	22000,00	121,00
Барлығы	100,00	75,81	24,20	100,00		8850,37

Органикалық қалдықтар бастапқыда 40,10 % болғанымен, сұрыптау кезінде 34,09 % жойылып, қалдықта 6,02 % немесе 24,86 % құрам үлесімен қалып, 1 кг үшін 3340 кДж жылулық құндылыққа және 1339,34 кДж/кг үлестік жылуға ие болды.

Пластмассаның бастапқы үлесі 15,80 % болып, сұрыптаудан кейін 5,53 % қалдық (22,86 % құрам) сақталып, оның 1 кг жылулық құндылығы 24 393,76 кДж/кг және үлестік жылуы 3854,21 кДж/кг-ке жетті.

Қағаз бен картон 16,40 %-дан 5,74 % қалдыққа (23,72 % құрам) дейін азайып, 9705,97 кДж/кг жылулық құндылықпен 1591,78 кДж/кг үлестік жылу берді.

Жалпы сұрыпталмаған қатты тұрмыстық қалдықтардың (ТҚҚ) үлестік жылулық мәні 8850,37 кДж/кг құрап, қалдықтардың негізгі жылу көзі пластмасса, қағаз/картон және тоқыма болып табылады.

Кесте 4. Астана қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атауы	Үлгідегі компоненттің массасы, кг	Пайыз, %	Жалпы масса, кг	1 кг компоненттің жылулық мәні, кДж/кг	Үлгі массасындағы меншікті жылу мәні, кДж/кг	ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылғаны, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрамы, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
1	Қағаз/картон	3,91	20,99	18,63	9705,97	2037,06	Органикалық қалдықтар	36,72	31,21	5,51	21,84	3340,00	1226,45
2	Тоқыма және былғары	3,41	18,30		15720,88	2877,52	Пластмасса	19,43	12,63	6,80	26,96	24393,76	4739,71
3	Пластмасса	4,47	23,99		24393,76	5852,93	Қағаз/картон	19,46	12,65	6,81	27,00	9705,97	1888,78
4	Органикалық қалдықтар	4,70	25,23		3340,00	842,62	Жаялықтар	2,87	2,87	0,00	0,00	12000,0	344,40
5	Керамика	1,23	6,60		0,00	0,00	Шыны	6,87	6,87	0,00	0,00	0,00	0,00
6	Металл	0,57	3,06		0,00	0,00	Тоқыма және былғары	2,26	0,00	2,26	8,96	17999,41	406,79
7	Былғары және резеңке	0,08	0,43		25661,24	110,19	Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	5,69	5,69	0,00	0,00	7000,00	398,30
8	Ағаш	0,26	1,40		14507,88	202,47	Керамика және құрылыс қалдықтары	3,26	0,98	2,28	9,05	0,00	0,00
	Барлығы	18,63	100,00			11922,79	Металл	1,95	0,98	0,98	3,87	0,00	0,00

						Ағаш	1,17	0,59	0,59	2,32	14507,88	169,74
						Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары	0,32	0,32	0,00	0,00	22000,00	70,40
						Барлығы	100,00	74,78	25,22	100,00		9244,57

Үлгі құрамында ең көп үлес органикалық қалдықтарға (4,70 кг немесе 25,23 %) тиесілі, олардың 1 кг жылулық құндылығы 3340 кДж/кг және үлгідегі меншікті жылу мәні 842,62 кДж/кг құрайды. Пластмасса 4,47 кг (23,99 %) көлемде болып, 1 кг үшін 24 394 кДж/кг жылулыққа ие, сондықтан үлгінің ең жоғары меншікті жылу мәнін (5852,93 кДж/кг) қамтамасыз етеді. Қағаз-картон 3,91 кг (20,99 %) болып, 9706 кДж/кг жылулық құндылығымен 2037,06 кДж/кг үлестік жылу береді, ал тоқыма мен былғары 3,41 кг (18,30 %) массасымен 2877,52 кДж/кг жылу қосады. Сұрыптау нәтижесінде жалпы ТҚҚ-ның 25,22 %-ы жойылып, қалған бөліктің негізгі жылулық әлеуетін пластмасса (4739,71 кДж/кг) мен қағаз-картон (1888,78 кДж/кг) құрайды. Барлық сұрыпталмаған қалдықтардың орташа үлестік жылулық мәні 9244,57 кДж/кг болып анықталды.

Кесте 5. Астана қаласындағы сұрыпталған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атуы	Үлгідегі компонент салмағы, кг	Үлесі, %	Жалпы салмағы, кг	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері, кДж/кг
1	Қағаз/картон	3,91	20,99	18,63	9705,97	2037,06
2	Тоқыма және былғары	3,41	18,30		15720,88	2877,52
3	Пластмасса	4,47	23,99		24393,76	5852,93
4	Органикалық қалдықтар	4,70	25,23		3340,00	842,62
5	Керамика	1,23	6,60		0,00	0,00
6	Металл	0,57	3,06		0,00	0,00
7	Былғары және резеңке	0,08	0,43		25661,24	110,19
8	Ағаш	0,26	1,40		14507,88	202,47
	Барлығы	18,63	100,00			11,922.79

Үлгіде ең үлкен үлес органикалық қалдықтарға тиесілі – 4,70 кг немесе 25,23 %, олардың 1 кг жылулық құндылығы 3340 кДж/кг және үлгідегі меншікті жылу мөлшері 842,62 кДж/кг құрайды. Пластмасса 4,47 кг (23,99 %) көлемімен 24 393,76 кДж/кг жылулыққа ие болып, 5852,93 кДж/кг үлестік жылу береді және үлгінің ең үлкен энергия әлеуетін қамтамасыз етеді. Қағаз-картон 3,91 кг (20,99 %) салмағымен 9705,97 кДж/кг жылулық құндылық көрсетіп, 2037,06 кДж/кг меншікті жылу мөлшерін қосады, ал тоқыма және былғары 3,41 кг (18,30 %) массасымен 2877,52 кДж/кг жылу қосады. Жалпы үлгінің массасы 18,63 кг, ал оның жиынтық меншікті жылу мөлшері 11 922,79 кДж/кг болып есептеледі.

Кесте 6. Алматы қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылған, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрам, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
Органикалық қалдықтар	36,72	31,21	5,51	21,84	3340,00	1226,45
Пластмасса	19,43	12,63	6,80	26,96	24393,76	4739,71
Қағаз/картон	19,46	12,65	6,81	27,00	9 705,97	1888,78
Жаялықтар	2,87	2,87	0,00	0,00	12000,00	344,40
Шыны	6,87	6,87	0,00	0,00	0,00	0,00
Тоқыма және былғары	2,26	0,00	2,26	8,96	17999,41	406,79
Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	5,69	5,69	0,00	0,00	7000,00	398,30
Керамика және құрылыс қалдықтары	3,26	0,98	2,28	9,05	0,00	0,00
Металл	1,95	0,98	0,98	3,87	0,00	0,00
Ағаш	1,17	0,59	0,59	2,32	14507,88	169,74
Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары	0,32	0,32	0,00	0,00	22000,00	70,40
Барлығы	100,00	74,78	25,22	100,00		9244,57

ТҚҚ негізгі үлесін органикалық қалдықтар (36,72 %), пластмасса (19,43 %) және қағаз-картон (19,46 %) құрайды. Сұрыптау кезінде қалдықтың 25,22 %-ы жойылып, пластмасса мен қағаз-картонның сұрыптаудан кейінгі құрамы тиісінше 26,96 % және 27,00 % болып

айтарлықтай өседі. Жылулық құндылығы бойынша ең жоғары көрсеткіш пластмассаға (24 393,76 кДж/кг) тиесілі, ол сұрыпталмаған ТҚҚ-ның үлестік жылулық мәніне 4739,71 кДж/кг қосып, негізгі энергия әлеуетін қамтамасыз етеді. Жалпы сұрыпталмаған қалдықтардың орташа үлестік жылулық мәні 9244,57 кДж/кг құрайды.

Кесте 7. Алматы қаласындағы сұрыпталған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атуы	Үлгідегі компонент салмағы, кг	Үлесі, %	Жалпы салмағы, кг	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері, кДж/кг
1	Қағаз/картон	5,77	27,00	21,36	9705,97	2620,61
2	Тоқыма/шүберек	1,87	8,76		15720,88	1376,40
3	Пластмасса	5,76	26,96		24393,76	6576,56
4	Органикалық қалдықтар	4,67	21,84		3340,00	729,46
5	Керамика	1,93	9,05		0,00	0,00
6	Металл	0,83	3,87		0,00	0,00
7	Былғары және резеңке	0,04	0,21		25661,24	52,71
8	Ағаш	0,50	2,32		14507,88	336,58
	Барлығы	21,36	100,00			11692,31

Кестеде берілгендей ең үлкен үлесті пластмасса (5,76 кг немесе 26,96 %) мен қағаз-картон (5,77 кг немесе 27,00 %) құрайды; олардың 1 кг жылулық құндылығы тиісінше 24 393,76 және 9 705,97 кДж/кг, ал үлгідегі меншікті жылу мөлшері 6 576,56 және 2 620,61 кДж/кг болды. Органикалық қалдықтар 4,67 кг (21,84 %) салмағымен 3 340 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 729,46 кДж/кг үлестік жылу береді. Тоқыма/шүберек 1,87 кг (8,76 %) массасымен 15 720,88 кДж/кг жылулық құндылық көрсетіп, 1 376,40 кДж/кг меншікті жылу мөлшерін қамтамасыз етеді. Барлық үлгінің жалпы массасы 21,36 кг құрап, жиынтық меншікті жылу мөлшері 11 692,31 кДж/кг болып анықталды.

Кесте 8. Ақтөбе қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылған, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрам, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
Органикалық қалдықтар	31,39	26,68	4,71	19,02	3340,00	1048,43
Пластмасса	18,21	11,84	6,37	25,74	24393,76	4442,10

Қағаз/картон	19,34	12,57	6,77	27,34	9705,97	1877,13
Жаялықтар	7,02	7,02	0,00	0,00	12 000,00	842,40
Шыны	5,73	5,73	0,00	0,00	0,00	0,00
Тоқыма және былғары	3,24	0,00	3,24	13,09	17999,41	583,18
Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	8,77	8,77	0,00	0,00	7000,00	613,90
Керамика және құрылыс қалдықтары	3,29	0,99	2,30	9,30	0,00	0,00
Металл	1,85	0,93	0,93	3,74	0,00	0,00
Ағаш	0,88	0,44	0,44	1,78	14,507.88	127,67
Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары	0,28	0,28	0,00	0,00	22000,00	61,60
Барлығы	100,00	75,24	24,76	100,00		9596,41

ТҚҚ негізгі үлесін органикалық қалдықтар (31,39 %), қағаз-картон (19,34 %) және пластмасса (18,21 %) құрайды. Сұрыптау барысында қалдықтың 24,76 %-ы жойылып, пластмасса мен қағаз-картонның сұрыптаудан кейінгі құрамдағы үлесі тиісінше 25,74 % және 27,34 % деңгейіне дейін артады. Жылулық құндылығы ең жоғары компонент пластмасса болып (24 393,76 кДж/кг), ол сұрыпталмаған ТҚҚ-ның үлестік жылулық мәніне 4442,10 кДж/кг қосып, негізгі энергия әлеуетін қамтамасыз етеді. Жалпы сұрыпталмаған қалдықтардың орташа үлестік жылулық мәні 9596,41 кДж/кг құрайды.

Кесте 9. Ақтөбе қаласындағы сұрыпталған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атуы	Үлгідегі компонент салмағы, кг	Үлесі, %	Жалпы салмағы, кг	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері, кДж/кг
1	Қағаз/картон	5,43	27,34	19,87	9705,97	2653,57
2	Тоқыма/шүберек	2,54	12,79		15,720,88	2010,10
3	Пластмасса	5,11	25,74		24,393,76	6279,48
4	Органикалық қалдықтар	3,78	19,02		3340,00	635,18
5	Керамика	1,85	9,30		0,00	0,00
6	Металл	0,74	3,74		0,00	0,00
7	Былғары және резеңке	0,06	0,30		25661,24	76,97
8	Ағаш	0,35	1,78		14507,88	257,82
	Барлығы	19,87	100,00			11913,13

Кесте 10. Шымкент қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылған, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрам, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
Органикалық қалдықтар	39,42	33,51	5,91	21,87	3340,00	1316,63
Пластмасса	19,03	12,37	6,66	24,63	24393,76	4642,13
Қағаз/картон	18,89	12,28	6,61	24,45	9705,97	1833,46
Жаялықтар	2,13	2,13	0,00	0,00	12000,00	255,60
Шыны	7,46	7,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Тоқыма және былғары	4,66	0,00	4,66	17,23	17999,41	838,77
Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	2,43	2,43	0,00	0,00	7000,00	170,10
Керамика және құрылыс қалдықтары	1,32	0,40	0,92	3,42	0,00	0,00
Металл	2,18	1,09	1,09	4,03	0,00	0,00
Ағаш	2,36	1,18	1,18	4,36	14507,88	342,39
Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары		0,12	0,00	0,00	22,000,00	26,40
Барлығы	100,00	72,96	27,04	100,00		9425,48

Кестедегі деректерге сәйкес тұрмыстық қатты қалдықтардың негізгі бөлігін органикалық қалдықтар (39,42 %), пластмасса (19,03 %) және қағаз-картон (18,89 %) құрайды. Сұрыптау барысында жалпы қалдықтың 27,04 %-ы жойылып, пластмасса мен қағаз-картонның сұрыптаудан кейінгі құрамдағы үлесі шамамен 24–25 % деңгейіне көтерілді. Жылулық құндылығы ең жоғары компонент – пластмасса (24 393,76 кДж/кг), ол сұрыпталмаған ТҚҚ-ның үлестік жылулық мәніне 4642,13 кДж/кг қосып, негізгі энергия әлеуетін қамтамасыз етеді. Тоқыма және былғары 4,66 % үлеспен 17 999,41 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 838,77 кДж/кг үлестік жылу қосады. Жалпы сұрыпталмаған қалдықтардың орташа үлестік жылулық мәні 9425,48 кДж/кг құрайды.

Кесте 11. Шымкент қаласындағы сұрыпталған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атуы	Үлгідегі компонент салмағы, кг	Үлесі, %	Жалпы салмағы, кг	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері, кДж/кг
1	Қағаз/картон	4,64	24,45	18,96	9705,97	2373,28

2	Тоқыма/шүберек	3,19	16,84		15720,88	2647,29
3	Пластмасса	4,67	24,63		24393,76	6008,90
4	Органикалық қалдықтар	4,15	21,87		3340,00	730,40
5	Керамика	0,65	3,42		0,00	0,00
6	Металл	0,76	4,03		0,00	0,00
7	Былғары және резеңке	0,07	0,40		25661,24	101,37
8	Ағаш	0,83	4,36		14507,88	633,13
	Барлығы	18,96	100,00			12494,38

Үлгідегі ең ірі үлесті пластмасса (4,67 кг немесе 24,63 %) және қағаз/картон (4,64 кг немесе 24,45 %) құрайды; олардың 1 кг жылулық құндылығы тиісінше 24 393,76 және 9 705,97 кДж/кг, ал үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері 6 008,90 және 2 373,28 кДж/кг болды. Тоқыма/шүберек 3,19 кг (16,84 %) массасымен 15 720,88 кДж/кг жылулық құндылық көрсетіп, 2 647,29 кДж/кг үлестік жылу береді. Органикалық қалдықтар 4,15 кг (21,87 %) салмағымен 3 340 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 730,40 кДж/кг үлестік жылу қосады. Ағаш 0,83 кг (4,36 %) көлемімен 14 507,88 кДж/кг жылулыққа ие болып, 633,13 кДж/кг меншікті жылу мөлшерін қамтамасыз етеді. Жалпы үлгінің массасы 18,96 кг, ал жиынтық меншікті жылу мөлшері 12 494,38 кДж/кг болып анықталды.

Кесте 12. Қарағанды қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылған, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрам, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
Органикалық қалдықтар	26,80	22,78	4,02	17,23	3340,00	895,12
Пластмасса	16,45	10,69	5,76	24,67	24393,76	4012,77
Қағаз/картон	18,76	12,19	6,57	28,14	9705,97	1820,84
Жаялықтар	5,87	5,87	0,00	0,00	12000,00	704,40
Шыны	11,87	11,87	0,00	0,00	0,00	0,00
Тоқыма және былғары	2,97	0,00	2,97	12,73	17999,41	534,58
Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	10,27	10,27	0,00	0,00	7000,00	718,90
Керамика және құрылыс қалдықтары	3,36	1,01	2,35	10,08	0,00	0,00
Металл	2,32	1,16	1,16	4,97	0,00	0,00

Ағаш	1,02	0,51	0,51	2,19	14507,88	147,98
Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары	0,31	0,31	0,00	0,00	22000,00	68,20
Барлығы	100,00	76,66	23,34	100,00		8902,80

Қарағанды қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамына сәйкес тұрмыстық қатты қалдықтардың негізгі үлесін органикалық қалдықтар (26,80 %), қағаз-картон (18,76 %) және пластмасса (16,45 %) құрайды. Сұрыптау барысында қалдықтың 23,34 %-ы жойылып, пластмасса мен қағаз-картонның сұрыптаудан кейінгі құрамдағы үлесі тиісінше 24,67 % және 28,14 %-ға дейін өседі. Жылулық құндылығы ең жоғары компонент пластмасса болып (24 393,76 кДж/кг), ол сұрыпталмаған ТҚҚ-ның үлестік жылулық мәніне 4012,77 кДж/кг қосып, негізгі энергия әлеуетін қамтамасыз етеді. Жалпы сұрыпталмаған қалдықтардың орташа үлестік жылулық мәні 8902,80 кДж/кг болып есептеледі. Сұрыпталғаннан кейін үлгі құрамында ең көп үлесті қағаз/картон (5,66 кг немесе 28,14 %) және пластмасса (4,96 кг немесе 24,67 %) құрайды; олардың 1 кг жылулық құндылығы тиісінше 9 705,97 және 24 393,76 кДж/кг, ал үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері 2 731,01 және 6 018,60 кДж/кг болды. Тоқыма/шүберек 2,50 кг (12,44 %) салмағымен 15 720,88 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 1 954,99 кДж/кг үлестік жылу береді. Органикалық қалдықтар 3,47 кг (17,23 %) көлемінде 3 340,00 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 575,38 кДж/кг үлестік жылу қосады. Жалпы үлгінің массасы 20,12 кг, ал жиынтық меншікті жылу мөлшері 11 671,92 кДж/кг болып анықталды (кесте 13).

Кесте 13. Қарағанды қаласындағы сұрыпталған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атуы	Үлгідегі компонент салмағы, кг	Үлесі, %	Жалпы салмағы, кг	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Үлгі массасындағы меншікті жылу мөлшері, кДж/кг
1	Қағаз/картон	5,66	28,14	20,12	9705,97	2731,01
2	Тоқыма/шүберек	2,50	12,44		15720,88	1954,99
3	Пластмасса	4,96	24,67		24393,76	6018,60
4	Органикалық қалдықтар	3,47	17,23		3340,00	575,38
5	Керамика	2,03	10,08		0,00	0,00
6	Металл	1,00	4,97		0,00	0,00
7	Былғары және резеңке	0,06	0,29		25661,24	74,86
8	Ағаш	0,44	2,19		14507,88	317,07
	Барлығы	20,12	100,00			11671,92

Кесте 14. Өскемен қаласындағы сұрыпталмаған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

ТҚҚ үлесі	Орташа кіріс, %	Жойылған, %	Сұрыптаудан кейінгі қалдық, %	Сұрыптаудан кейінгі құрам, %	1 кг компоненттің жылулық құндылығы, кДж/кг	Сұрыпталмаған ТҚҚ үлестік жылулық мәні, кДж/кг
Органикалық қалдықтар	24,54	20,86	3,68	16,11	3340,00	819,64
Пластмасса	18,97	12,33	6,64	29,06	24393,76	4627,50
Қағаз/картон	17,56	11,41	6,15	26,90	9705,97	1704,37
Жаялықтар	6,74	6,74	0,00	0,00	12000,00	808,80
Шыны	8,56	8,56	0,00	0,00	0,00	0,00
Тоқыма және былғары	2,67	0,00	2,67	11,69	17999,41	480,58
Басқа ұсақ фракция (<12 мм)	14,46	14,46	0,00	0,00	7000,00	1 012,20
Керамика және құрылыс қалдықтары	2,89	0,87	2,02	8,85	0,00	0,00
Металл	2,24	1,12	1,12	4,90	0,00	0,00
Ағаш	1,14	0,57	0,57	2,49	14507,88	165,39
Электр және электронды жабдықтардың қалдықтары	0,23	0,23	0,00	0,00	22000,00	50,60
Барлығы	100,00	77,15	22,85	100,00		9669,07

Кестедегі мәліметтер бойынша сұрыпталмаған тұрмыстық қатты қалдықтардың негізгі бөлігін органикалық қалдықтар (24,54 %), пластмасса (18,97 %) және қағаз-картон (17,56 %) құрайды. Сұрыптау кезінде жалпы қалдықтың 22,85 %-ы жойылып, пластмасса мен қағаз-картонның сұрыптаудан кейінгі құрамдағы үлесі тиісінше 29,06 % және 26,90 %-ға дейін өсті. Жылулық құндылығы ең жоғары компонент пластмасса болып (24 393,76 кДж/кг), ол сұрыпталмаған ТҚҚ-ның үлестік жылулық мәніне 4627,50 кДж/кг қосып, негізгі энергия әлеуетін қамтамасыз етеді. Тоқыма және былғары 2,67 % үлесімен 17 999,41 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 480,58 кДж/кг үлестік жылу береді. Жалпы сұрыпталмаған қалдықтардың орташа үлестік жылулық мәні 9669,07 кДж/кг құрайды.

Кесте 15. Өскемен қаласындағы сұрыпталған қалдықтардың физика-химиялық құрамы

№	Компонент атуы	Үлгідегі компонент	Үлесі, %	Жалпы салмағы, кг	1 кг компоненттің жылулық	Үлгі массасындағы меншікті жылу
---	----------------	--------------------	----------	-------------------	---------------------------	---------------------------------

		салмағы, кг			құндылығы, кДж/кг	мөлшері, кДж/кг
1	Қағаз/картон	5,17	26,90	19,21	9705,97	2610,69
2	Тоқыма/шүберек	2,19	11,42		15720,88	1794,90
3	Пластмасса	5,58	29,06		24393,76	7088,22
4	Органикалық қалдықтар	3,09	16,11		3340,00	538,07
5	Керамика	1,70	8,85		0,00	0,00
6	Металл	0,94	4,90		0,00	0,00
7	Былғары және резеңке	0,05	0,27		25661,24	68,73
8	Ағаш	0,48	2,49		14507,88	361,91
	Барлығы	19,21	100,00			12462,52

Өскемен қаласы бойынша сұрыпталған қалдықтардың үлгі құрамында ең үлкен үлес пластмассаға тиесілі – 5,58 кг немесе 29,06 %, оның 1 кг жылулық құндылығы 24 393,76 кДж/кг және үлгідегі меншікті жылу мөлшері 7088,22 кДж/кг құрайды. Қағаз-картон 5,17 кг (26,90 %) көлемімен 9705,97 кДж/кг жылулыққа ие болып, 2610,69 кДж/кг үлестік жылу береді. Тоқыма/шүберек 2,19 кг (11,42 %) массасымен 15 720,88 кДж/кг жылулық құндылық көрсетіп, 1794,90 кДж/кг меншікті жылу мөлшерін қамтамасыз етеді. Органикалық қалдықтар 3,09 кг (16,11 %) салмағымен 3340,00 кДж/кг жылулық құндылыққа ие болып, 538,07 кДж/кг үлестік жылу қосады. Жалпы үлгінің массасы 19,21 кг, ал жиынтық меншікті жылу мөлшері 12 462,52 кДж/кг болып анықталды.

Кестеде 16 қалалар бойынша тұрмыстық қатты қалдықтардың жылулық құндылығын зерттеудің жиынтық нәтижелері берілген.

Кесте 16. Қалалар бойынша тұрмыстық қатты қалдықтардың жылулық құндылығы бойынша қорытындылардың жиынтық кестесі

Қала	Астана	Алматы	Ақтөбе	Шымкент	Қарағанды	Өскемен
Сұрыпталмаған ТҚҚ массасының орташа жылулық мәні, кДж/кг	8850,37	9 244,57	9 596,41	9 425,48	8 902,80	9669,07
Сұрыпталған ТҚҚ массасының орташа жылулық мәні, кДж/кг	11922,7	11692,31	11913,13	12494,38	11671,92	12462,52
Сұрыпталған ТҚҚ массасының төменгі жылулық мәні, кДж/кг	10473,36	10013,78	10013,1	10636,5	9734,72	10068,68

Астана қаласында сұрыпталмаған ТҚҚ-ның орташа жылулық мәні 8850,37 кДж/кг болса, сұрыптаудан кейін бұл көрсеткіш 11 922,7 кДж/кг-ге дейін өсіп, төменгі жылулық мәні 10473,36 кДж/кг құрайды. Алматыда сұрыпталмаған қалдықтардың жылулық құндылығы 9 244,57 кДж/кг, сұрыпталғаны 11 692,31 кДж/кг, ал төменгі жылулық мәні 10 013,78 кДж/кг болды. Ақтөбе, Шымкент және Қарағанды қалаларында да ұксас үрдіс байқалып, сұрыптаудан кейінгі орташа жылулық мәндер 11 913,13–12 494,38 кДж/кг аралығында болып, төменгі мәндері 10013,1–9734,72 кДж/кг деңгейінде қалды.

Өскеменде ең жоғары сұрыпталған қалдықтың орташа жылулық мәні 12462,52 кДж/кг-ге жетіп, төменгі жылулық мәні 10 068,68 кДж/кг болып тіркелді.

Кестеде 17 қалалар бойынша сұрыпталған ТҚҚ физикалық-химиялық құрамын зерттеудің жиынтық нәтижелері келтірілген.

Кесте 17. Қалалар бойынша сұрыпталған ТҚҚ физикалық-химиялық құрамын зерттеу нәтижелерінің жиынтық кестесі

Қала	Астана	Алматы	Ақтөбе	Шымкент	Қарағанды	Өскемен
ҚТТ	%					
Қағаз/картон	20,99	27,00	27,34	24,45	28,14	26,90
Тоқыма/шүберек	18,30	8,76	12,79	16,84	12,44	11,42
Пластмасса	23,99	26,96	25,74	24,63	24,67	29,06
Органикалық қалдықтар	25,23	21,84	19,02	21,87	17,23	16,11
Керамика	6,60	9,05	9,30	3,42	10,08	8,85
Металл	3,06	3,87	3,74	4,03	4,97	4,90
Былғары және резеңке	0,43	0,21	0,30	0,40	0,29	0,27
Ағаш	1,40	2,32	1,78	4,36	2,19	2,49
Барлығы	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Кестеден көргендей, барлық қалаларда пластмассаның үлесі ең жоғары – ол 23,99 % бен 29,06 % аралығында. Қағаз бен картон да айтарлықтай көп, әсіресе Қарағанды мен Ақтөбеде 27–28 % шамасында. Органикалық қалдықтар үлесі Астанада 25,23 % болса, Қарағанды мен Өскеменде 16–17 % деңгейінде, яғни салыстырмалы түрде төмен. Қалған фракциялар аз мөлшерде: керамика 3,42–10,08 %, металл 3–5 %, ал былғары, резеңке және ағаш үлесі барлық қалаларда 5 %-дан төмен.

4. Талдау

Бұрынғы зерттеулер (Serikova, A. және т.б., 2020; Inglezakis, V.J. және т.б., 2018) негізінен Қазақстанның Астана және Алматы сияқты орталық қалаларының қалдықтарына бағытталған. Бұл қалалар елдегі ең үлкен қалалар. Бұл қалалардағы ТҚҚ құрамын орташа деп санауға болмайды, өйткені ірі қалалардағы өмір сүру сипаттамалары шағын қалалардан айтарлықтай ерекшеленеді. Бұл зерттеудің алдыңғылардан айырмашылығы – Қазақстанның географиясын кеңірек қамту және алты ірі қала мысалында қатты тұрмыстық қалдықтарды талдау.

Зерттеу нәтижелеріне сүйене отырып, авторлар әрбір қала үшін ТҚҚ жоюдың ең тиімді технологияларына талдау жасады. Зерттеулер $n = 5-6$ өлшемдер үшін параллель жүргізілді. Сонымен қатар, әрбір тәжірибе $m = 10-15$ сериясынан жүргізілді. Эксперименттік деректер үлгілері үшін $p = 0,95$ ықтималдық үшін стандартты ауытқулар мен сенімділік интервалдары есептелді. Бұл статистикалық талдау зерттеу нәтижелерінің жоғары сенімділігін растайды. Өлшемдердің стандартты ауытқуы 2% аспайды.

Қалдықтарды басқарудың заманауи тұжырымдамалары әдетте ТҚҚ құрамдастарына тән ресурстық әлеуетті оңтайлы пайдалануды атап көрсетеді (Karungamye, P., 2024). Сонымен бірге өңдеуге қабылданған қалдықтардың құрамы қалдықтарды сұрыптау зауыттарында қайталама шикізатты іріктеу дәрежесіне әсер етеді, термиялық өңдеу әдістерін қолдану кезінде қалдықтардың жылулық құндылығын анықтайды (Kasiński, S. және т.б., 2024; Glazygin, S.A. және т.б., 2020) және биотехнологияны қолдану кезінде ыдырау процестерінің тиімділігін анықтайды және нәтижесінде белгілі бір технологияның техникалық-экономикалық көрсеткіштеріне әсер етеді.

Сұрыптау процесінің тиімділігі көптеген факторларға байланысты, соның ішінде:

- сұрыптау конвейері бойымен қалдықтардың қозғалу жылдамдығы: қалдықтар неғұрлым баяу қозғалса, соғұрлым ол компоненттер бойынша жақсы сұрыпталады;
- конвейердегі қалдық қабатының қалыңдығы: сұрыптау конвейеріндегі қалдық қабат неғұрлым жұқа болса, қалдықтар соғұрлым мұқият сұрыпталады.

Бірақ жылдамдықты азайту арқылы процестің тиімділігін арттыру өнімділіктің төмендеуіне әкеледі, сондықтан іс жүзінде басты назар жоғары сұрыптау тиімділігіне емес, ең жоғары өнімділікке аударылады. Практикада қолмен сұрыптаудың тиімділігі 0,4–0,8 құрайды.

Компоненттерді алудың тиімділігі бірнеше факторларға байланысты, соның ішінде:

- компоненттің табиғаты (ол сулануға, шіруге және т.б. сезімтал болуы мүмкін);
- қатты қалдықтардың сипаттамалары (бастапқы ылғалдылық, фракциялық құрамы және т.б.);
- маусым мен ауа райы жағдайлары (ылғалдану, мұздату және т.б.);
- қалдықтарды жинау және шығару жүйелері (жалпы немесе бөлек қалдықтарды жинау, тасымалдау кезінде қалдықтардың нығыздалу дәрежесі, артық тиеудің болуы және т.б.).

Бұл зерттеудің негізгі шектеулері тұрмыстық қатты қалдықтар жиналған аймақтардың және осы өңірлердің тұрғындары менталитетінің бір адамға шаққандағы қатты қалдықтардың құрамы мен үлестік көлеміне әсері болып табылады. Бұл шектеулер түзетуді қажет етпейді, өйткені олар болашақ зерттеулерде ескерілетін болады. Келесі қадам - барлық алты қаланың сұрыпталмаған және сұрыпталған қатты қалдықтарын жағу эксперименті. Бұл ретте әрбір қалада қатты тұрмыстық қалдықтарды жағу кезінде пайда

болатын түтін газдарының көлемі мен құрамы, сондай-ақ сұрыпталмаған және сұрыпталған қалдықтарды жағу кезінде пайда болатын күл мен қождың құрамы мен қасиеттері өлшенетін болады.

5. Қорытынды

Зерттеу нәтижесінде келесі нәтижелер алынды:

1. Қазақстанның алты қаласы: Астана, Алматы, Ақтөбе, Шымкент, Қарағанды және Өскемен үшін сұрыпталмаған және сұрыпталған тұрмыстық қатты қалдықтардың физика-химиялық құрамы анықталды;

2. Алты қаланың тұрмыстық қатты қалдықтарының термофизикалық сипаттамалары анықталды: күлділігі, ылғалдылығы, сонымен қатар жоғары (брутто) және төмен калориялық құндылығы.

Қазақстан қалаларындағы қатты тұрмыстық қалдықтардың физикалық-химиялық құрамының нәтижелері:

- Органикалық қалдықтардың мөлшері аймақтардың аспаздық дәстүрлеріне байланысты қолданылатын тамақ өнімдерінің ерекшеліктеріне байланысты өзгереді: оңтүстік пен астанада көбірек, орталық пен шығыста азырақ.

- Жөргек пен нәрестеге арналған көмекші материалдарының мөлшері де әртүрлі: оңтүстікте аз, басқа аймақтарда көп.

- Орташа алғанда, құрамдас бөліктердің мөлшері басқа компоненттер үшін салыстырмалы.

Бұл зерттеудің негізгі нәтижелері әрбір аймақта тұрмыстық қатты қалдықтарды кәдеге жаратудың оңтайлы технологиясын таңдау, сондай-ақ оның тиімділігі мен осы аймақтардағы экологиялық жағдайды әлеуетті жақсартуға қатысты болжамдар болып табылады.

Тұрмыстық қатты қалдықтарды кәдеге жаратудың ең қолайлы және оңтайлы технологиялары синтез газын өндіру және электр энергиясын және қосымша өнімдерді өндіру арқылы, жағу арқылы энергияны үнемдейтін және экологиялық таза пиролиз технологиялары болып табылады. Пиролиз қалдықтардың шағын көлемі үшін әсіресе тұрмыстық қалдықтардан басқа қалдықтардың басқа түрлері болса, оңтайлы түрде қолданылады,

Қатты тұрмыстық қалдықтардың үлкен көлемі үшін авторлар әзірлеген қалдықтар түзілмей жағу процесінің схемасын пайдалану оңтайлы болып табылады. Бұл схема жану процесінде пайда болған қатты, сұйық және газ тәрізді өнімдерді толық кәдеге жарату технологияларын қамтиды. Екі технология да тұрғындардың тіршілік әрекеті нәтижесінде пайда болған жаңа қалдықтарды ғана емес, сонымен қатар елді мекендердегі полигондардың ұяшықтарында жинақталған қалдықтарды кәдеге жаратуға, сол арқылы аумақты қатты тұрмыстық қалдықтардан толық тазартуға мүмкіндік береді.

6. Қосымша материалдар: қосымша материалдар жоқ.

7. Авторлық үлестер

Концептуализация – Е.А.; әдістеме – Т.М.; бағдарламалық қамтамасыз ету – А.К., Л.К., Т.М.; тексеру – Ж.И., А.С.; формальды талдау – Т.М., А.К.; тергеу – Р.С.; ресурстар – Р.С., А.С.; деректер кураторы – Т.М.; жазу – түпнұсқа жоба – Р.С., Е.А.; жазу – рецензиялау және редакциялау – А.К., А.С., Е.А., Т.М.; визуализация – Ж.И., Л.К.; қадағалау – Е.А.; жобаны басқару – Е.А.; әдістеме – Т.М.; бағдарламалық қамтамасыз ету – Е.А.; қаржыландыруды сатып алу – Е.А.

8. Авторлар туралы ақпарат

Айбульдинов, Еламан – бас ғылыми қызметкер, PhD, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу

институты; Ғылым және сыртқы байланыстар жөніндегі проректор, К. Кулажанов атындағы Қазақ технология және бизнес университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: elaman@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9143-4581>

Машан, Тоғжан – профессор, х.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: mashan_tt@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7598-1956>

Кусепова, Лязат – доцент, х.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: kusseпова_la@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6457-0999>

Сафаров, Руслан – зерттеуші-оқытушы, х.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: safarov_rz@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2158-6330>

Сабитов, Аят – докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: sabitov_as_1@enu.kz, <https://orcid.org/0009-0005-9475-2143>

Көлпек, Айнагүл – доцент, х.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті жаратылыстану ғылымдары факультетінің химия кафедрасы, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: kolpek_a@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6188-6229>

Искакова, Жанар – директор, х.ғ.к., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Жаңа химиялық технологиялар ғылыми-зерттеу институты, Қажымұқан көш., 13, Астана, Қазақстан, 010008; email: iskakova_zhb@enu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-4434-0707>

9. Қаржыландыру: Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды (бағдарламалық-мақсатты қаржыландыру гранты № BR21882171).

10. Алғыстар: ConsultTech ЖШС директоры Роман Ладуренкоға зерттеудегі технологиялық есептеулердің кәсіби консалтингтік көмегі үшін біз шын жүректен алғысымызды білдіргіміз келеді. Бұл жобаны жүзеге асыруда олардың тәжірибесі мен адалдығы маңызды рөл атқарды.

11. Мүдделер қақтығысы: Авторлар мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді. Демеушілер зерттеуді әзірлеуде, деректерді жинауда, талдауда немесе түсіндіруде; қолжазбаны жазуда немесе нәтижелерді жариялау туралы шешім қабылдауда ешқандай рөл атқарған жоқ.

12. Әдебиеттер тізімі

1. Abbas, R.I., Flayeh, H.M. (2024). Aerobic Composting of Organic Waste, Alternative and an Efficient Solid Waste Management Solution. *Asian J. Water Environ. Pollut.* 21, 101–111. <https://doi.org/10.3233/AJW240051>
2. Abis, M., Bruno, M., Kuchta, K., Simon, F.-G., Grönholm, R., Hoppe, M., Fiore, S. (2020). Assessment of the Synergy between Recycling and Thermal Treatments in Municipal Solid Waste Management in Europe. *Energies* 13, 6412. <https://doi.org/10.3390/en13236412>
3. Bhatt, A.K., Bhatia, R.K., Thakur, S., Rana, N. (2018). Fuel from Waste: A Review on Scientific Solution for Waste Management and Environment Conservation. *Prospects*

- of *Alternative Transportation Fuels* 205–233. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7518-6_10
4. Bhatt, K.P., Patel, S., Upadhyay, D.S., Patel, R.N. (2022). A critical review on solid waste treatment using plasma pyrolysis technology. *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.* 177, 108989. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108989>
 5. Bułkowska, K., Zielińska, M. (2024). Recovery of Biogas and Other Valuable Bioproducts from Livestock Blood Waste: A Review. *Energies* 17, 5873. <https://doi.org/10.3390/en17235873>
 6. Cao, X., Williams, P.N., Zhan, Y., Coughlin, S.A., McGrath, J.W., Chin, J.P., Xu, Y. (2023). Municipal solid waste compost: Global trends and biogeochemical cycling. *Soil Environ. Health* 1, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.seh.2023.100038>
 7. Chatterjee, R., Sajjadi, B., Chen, W.-Y., Mattern, D.L., Hammer, N., Raman, V., Dorris, A. (2020). Effect of Pyrolysis Temperature on Physico-Chemical Properties and Acoustic-Based Amination of Biochar for Efficient CO₂ Adsorption. *Front. Energy Res.* 8, 85. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00085>
 8. Chen, B., Perumal, P., Illikainen, M., Ye, G. (2023). A review on the utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash as a mineral resource for construction materials. *J. Build. Eng.* 71, 106386. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106386>
 9. Chen, H., Song, X., Jian, Y. (2024). Performance Assessment of a Municipal Solid Waste Gasification and Power Generation System Integrated with Absorption Heat Pump Drying. *Energies* 17, 6034. <https://doi.org/10.3390/en17236034>
 10. Chen, T., Ku, X., Li, T., Karlsson, B.S.A., Sjöblom, J., Ström, H. (2021). High-temperature pyrolysis modeling of a thermally thick biomass particle based on an MD-derived tar cracking model. *Chem. Eng. J.* 417, 127923. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127923>
 11. Chalkidis, A., Jampaiah, D., Aryana, A., Wood, C.D., Hartley, P.G., Sabri, Y.M., Bhargava, S.K. (2020). Mercury-bearing wastes: Sources, policies and treatment technologies for mercury recovery and safe disposal. *J. Environ. Manag.* 270, 110945. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110945>
 12. Dharnaik, A.S., Pramodini, P. (2024). A Review on Composting of Organic Solid Waste. In *Proceedings of the 1st International Conference on Creative and Innovative Solutions in Civil Engineering, CISCE. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 1326, 012130. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1326/1/012130>
 13. Dronia, W., Połomka, J., Jełdrczak, A. (2024). Quantity and Material Composition of Foreign Bodies in Bio-Waste Collected in Towns from Single- and Multi-Family Housing and in Rural Areas. *Energies* 17, 4350. <https://doi.org/10.3390/en17174350>
 14. Du, Y., Ju, T., Meng, Y., Lan, T., Han, S., Jiang, I. (2021). A review on municipal solid waste pyrolysis of different composition for gas production. *Fuel Process. Technol.* 224, 107026. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107026>
 15. Glazyrin, S.A., Aibuldinov, Y.K., Kopishev, E.E., Zhumagulov, M.G., Bimurzina, Z.A. (2024). Analysis of the Composition and Properties of Municipal Solid Waste from Various Cities in Kazakhstan. *Energies* 17(24), 6426. <https://doi.org/10.3390/en17246426>
 16. Glazyrin, S.A., Aidymbaeva, Z.A., Dostiyarov, A.M., Zhumagulov, M.G., Zlatov, N., Strefanovic', V.P. (2020, April 23). Method for Cleaning Flue Gases of a Drum-Type Power Boiler. Patent of Republic of Kazakhstan. No. 5184 (Sposob ochistki dymovykh gazov barabannogo parovogo kotla In Russian).
 17. Gonçalves, M.F.S., Petraconi Filho, G., Couto, A.A., da Silva Sobrinho, A.S., Miranda, F.S., Massi, M. (2022). Evaluation of thermal plasma process for treatment disposal of solid radioactive waste. *J. Environ. Manag.* 311, 114895. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.1148>

18. Karunasena, G., Gajanayake, A., Wijeratne, W.M., Pabasara, U., Milne, N., Udawatta, N., Perera, S., Crimston, A., Aliviano, P. (2023). Liquid waste management in the construction sector: A systematic literature review. *Int. J. Constr. Manag.* 24, 86–96. <https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2211416>
19. Karungamye, P. (2024). Energy recovery from solid waste valorisation: Environmental and economic potential for developing countries. *Sci. Afr.* 26, e02402. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02402>
20. Kasiński, S., Debowski, M. (2024). Municipal Solid Waste as a Renewable Energy Source: Advances in Thermochemical Conversion Technologies and Environmental Impacts. *Energies* 17, 4704. <https://doi.org/10.3390/en17184704>
21. Kuo, W.-C., Lasek, J., Słowik, K., Głód, K., Jagustyn, B., Li, Y.-H., Cygan, A. (2019). Low-temperature pre-treatment of municipal solid waste for efficient application in combustion systems. *Energy Convers. Manag.* 196, 525–535. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.007>
22. Li, J., An, D., Shi, Y., Bai, R., Du, S. (2024). A Review of the Physical and Chemical Characteristics and Energy-Recovery Potential of Municipal Solid Waste in China. *Energies* 17, 491. <https://doi.org/10.3390/en17020491>
23. Long, Y., Hu, Y., Wang, H., Jia, J., Huang, H., Shen, D., Gu, F. (2024). Effective disposal of hazardous waste from non-ferrous waste recycling through thermal treatment. *J. Clean. Prod.* 434, 140004. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140004>
24. Nasrullah, M., Vainikka, P., Hannula, J., Hurme, M., Karki, J. (2015). Mass, energy and material balances of SRF production process. Part 3: Solid recovered fuel produced from municipal solid waste. *Waste Manag. Res.* 33, 146–156. <https://doi.org/10.1177/0734242X14563375>
25. Nobre, C., Sen, A., Durão, L., Miranda, I., Pereira, H., Gonçalves, M. (2023). Low-temperature pyrolysis products of waste cork and lignocellulosic biomass: Product characterization. *Biomass Convers. Biorefinery* 13, 2267–2277. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01300-8>
26. Nukusheva, A., Rustembekova, D., Abdizhami, A., Au, T., Kozhantayeva, Z. (2023). Regulatory Obstacles in Municipal Solid Waste Management in Kazakhstan in Comparison with the EU. *Sustainability* 15, 1034. <https://doi.org/10.3390/su15021034>
27. Park, D.K., Kim, J.-H., Kim, H.-S., Kim, J.-H., Ryu, J.-H. (2023). Possibility Study in CO₂ Free Hydrogen Production Using Dodecane (C₁₂H₂₆) from Plasma Reaction. *Energies* 16, 1589. <https://doi.org/10.3390/en16041589>
28. Patil, Y.R., Dakwale, V.A., Ralegaonkar, R.V. (2024). Recycling Construction and Demolition Waste in the Sector of Construction. *Adv. Civ. Eng.* 6234010. <https://doi.org/10.1155/2024/6234010>
29. Pech-Rodríguez, W.J., Meléndez-González, P.C., Hernández-López, J.M., Suarez-Velázquez, G.G., Sarabia-Castillo, C.R., Calles-Arriaga, C.A. (2024). Pharmaceutical Wastewater and Sludge Valorization: A Review on Innovative Strategies for Energy Recovery and Waste Treatment. *Energies* 17, 5043. <https://doi.org/10.3390/en17205043>
30. Provisional Statement on the State of the Global Climate in 2018; World Meteorological Organization (WMO): Geneva, Switzerland, 2018, 47 p.
31. Puri, L., Hu, T., Naterer, G. (2024). Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. *Front. Fuels* 2, 1378361. <https://doi.org/10.3389/ffuel.2024.1378361>
32. Qi, Y.-P., He, P.-J., Lan, D.-Y., Xian, H.-Y., Lü, F., Zhang, H. (2022). Rapid determination of moisture content of multi-source solid waste using ATR-FTIR and multiple machine learning methods. *Waste Manag.* 153, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.08.014>

33. Ratomski, P., Hawrot-Paw, M., Koniuszy, A., Golimowski, W., Kwas'nica, A., Marcinkowski, D. (2023). Indicators of Engine Performance Powered by a Biofuel Blend Produced from Microalgal Biomass: A Step towards the Decarbonization of Transport. *Energies* 16, 5376. <https://doi.org/10.3390/en16145376>
34. Rodrigues, J.A.P., Pinto, N.A.B.T., Leite, L.A., dos, S.B., Pereira, A.O. (2024). Production of Bio-Oil via Pyrolysis of Banana Peel and Tire Waste for Energy Utilization. *Energies* 17, 6149. <https://doi.org/10.3390/en17236149>
35. Serikova, A., Baidakov, A., Syrlybayeva, N. (2020). The organization of municipal solid waste collection, disposal and recycling in Kazakhstan. *E3S Web Conf.* 159, 01010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015901010>
36. Sikder, S., Toha, M., Rahman, M.M. (2024). Municipal Solid Waste Incineration: An Incredible Method for Reducing Pressures on Landfills. *Technical Landfills and Waste Management* 7, 169–188. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55665-4_7
37. Soares, C. (2015). Chapter 7-Gas Turbine Fuel Systems and Fuels. In *Gas Turbines*, 2nd ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 317–411. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410461-7.00007-9>
38. Sobieraj, K., Stegenta-Dąbrowska, S., Koziel, J.A., Białowiec, A. (2021). Modeling of CO Accumulation in the Headspace of the Bioreactor during Organic Waste Composting. *Energies* 14, 1367. <https://doi.org/10.3390/en14051367>
39. The Law of the Republic of Kazakhstan. The Environmental Code of the Republic of Kazakhstan Dated 2 January 2021 No. 400-VI LRK. (Including the Changes from 2 October 2023); Akorda: Astana, Kazakhstan, 2023, 446 p. Available online: <https://www.gov.kz/memleket/entities/cerc/documents/details/113729?lang=kk>
40. Torrubia, J., Torres, C., Valero, A., Valero, A., Parvez, A.M., Sajjad, M., Paz, F.G. (2024). Applying Circular Thermoconomics for Sustainable Metal Recovery in PCB Recycling. *Energies* 17, 4973. <https://doi.org/10.3390/en17194973>
41. Traven, L. (2023). Sustainable energy generation from municipal solid waste: A brief overview of existing technologies. *Case Stud. Chem. Environ. Eng.* 8, 100491. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100491>
42. Wikira, N., Bazooyar, B., Darabkhani, H.G. (2024). Modelling and Analysis of Low and Medium-Temperature Pyrolysis of Plastics in a Fluidized Bed Reactor for Energy Recovery. *Energies* 17, 6204. <https://doi.org/10.3390/en17236204>
43. Williams, P.T. *Waste Treatment and Disposal*; John Wiley & Sons Ltd.: Chichester, UK, 2005, 388 p.
44. World Meteorological Organization (WMO). State of the Climate 2024. Update for COP29; WMO: Geneva, Switzerland, 2024, 12 p. Available online: <https://library.wmo.int/records/item/69075-state-of-the-climate-2024> (accessed on 11 November 2024).
45. Xu, M.-X., Di, J.-Y., Wu, Y.-C., Meng, X.-X., Ji, H., Jiang, H., Li, J.-H., Lu, Q. (2023). Insights into the pyrolysis mechanisms of epoxy resin polymers based on the combination of experiments and ReaxFF-MD simulation. *Chem. Eng. J.* 473, 145404. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145404>
46. Yanamandra, K., Pinisetty, D., Daoud, A., Gupta, N. (2022). Recycling of Li-Ion and Lead Acid Batteries: A Review. *J. Indian Inst. Sci.* 102, 281–295. <https://doi.org/10.1007/s41745-021-00269-7>
47. Young, G.C. *Municipal Solid Waste to Energy Conversion Processes; Economic, Technical, and Renewable Comparisons*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2010, 398 p.
48. Zajac, M., Skrajna, T. (2024). Effect of Composted Organic Waste on Miscanthus sinensis Andersson Energy Value. *Energies* 17, 2532. <https://doi.org/10.3390/en17112532>

Analysis of the composition and properties of solid municipal waste in cities of Kazakhstan

Yelaman Aibuldinov, Togzhan Mashan, Lyazat Kusepova, Ruslan Safarov, Aiyat Sabitov, Ainagul Kolpek, Zhanar Iskakova

Abstract: According to the Bureau of National Statistics of the Republic of Kazakhstan, by the end of 2023, approximately 120 million tons of municipal solid waste (MSW) had been generated across over 3200 landfills in the country. The accumulation of both unsorted and sorted waste poses significant environmental risks, primarily through the generation of methane, a greenhouse gas that is 28 times more dangerous than carbon dioxide in contributing to the planet's greenhouse effect over a century and 84 times more effective over a 20-year timeframe. The objective of this research is to examine the physicochemical composition, as well as the physical and thermal-chemical properties, of municipal solid waste from six cities in Kazakhstan: Astana, Almaty, Shymkent, Aktobe, Karaganda, and Ust-Kamenogorsk. Analysis of the physicochemical composition was conducted for both unsorted and sorted municipal solid waste from all cities, determining the total and analytical moisture content, ash content, and volatile matter, as well as the higher and lower calorific values. The efficiency factor of the manual sorting process in practice was 0.4–0.8. The results obtained enable the evaluation of technologies for the effective management of municipal solid waste and facilitate experimental investigations into semi-industrial pyrolysis, combustion, plasma processing, and composting facilities.

Keywords: waste-free production; waste recycling; household waste; pyrolysis; energy-efficient technologies; synthesis gas; thermal energy; methane; carbon dioxide; greenhouse gases.

Анализ состава и свойств твердых бытовых отходов в городах Казахстана

Еламан Айбульдинов, Тогжан Машан, Ляззат Кусепова, Руслан Сафаров, Аят Сабитов, Айнагуль Колпек, Жанар Искакова

Аннотация: По данным Национального бюро статистики Республики Казахстан, к концу 2023 года в стране на более чем 3200 полигонах будет собрано около 120 миллионов тонн твердых бытовых отходов (ТБО). Ежегодно образуется около 4,5 миллионов тонн, из которых перерабатывается лишь 15 процентов. Накопление несортированных и сортированных отходов представляет значительные экологические риски, в первую очередь из-за образования метана – парникового газа, который по воздействию на парниковый эффект планеты в 28 раз опаснее углекислого газа, а по эффективности за 20 лет – в 84 раза. Целью данного исследования является изучение физико-химического состава, а также физических и термохимических свойств ТБО из шести городов Казахстана: Астаны, Алматы, Шымкента, Актобе, Караганды и Усть-Каменогорска. В данном исследовании использовалась одна выборка отходов, которая включала полное опорожнение десятков контейнеров из разных районов рассматриваемых городов. Таким образом, был сохранен средний состав твердых бытовых отходов по городам. Проведен анализ физико-химического состава несортированных и сортированных твердых бытовых отходов всех городов, определены общая и аналитическая влажность, содержание золы и летучих веществ, а также верхняя и нижняя теплоты сгорания. Оценена эффективность сортировки как первой стадии переработки ТБО. Коэффициент эффективности ручной сортировки на практике составил 0,4–0,8. Полученные результаты позволяют оценить

эффективность технологий обращения с твердыми бытовыми отходами и способствуют экспериментальным исследованиям полупромышленных установок пиролиза, сжигания, плазменной переработки и хранения.

Ключевые слова: безотходное производство; переработка отходов; бытовые отходы; пиролиз; энергоэффективные технологии; синтез-газ; тепловая энергия; метан; углекислый газ; парниковые газы.