

UO‘K: 67.08:347.218.1

doi 10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.38

© 2026 Authors. Licensed under CC BY 4.0

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

SOF, CHIQINDI, QAYTA ISHLANGAN VA PLASTIFIKATSIYALGAN POLIURETAN NAMUNALARINING QIYOSIY TERMOGRAVIMETRIK TAHLILI



**Shodiev Asliddin
Faxriddin o'g'li**

T.f.f.d. (PhD), Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti Agromuhandislik va
kommunikatsion texnologiyalar
fakulteti dekan o'rinbosari, Navoiy,
O'zbekiston
E-mail:
shodiyevasliddin22@gmail.com
ORCID ID: 0009-0006-7776-1950
Science ID: FNV-0525-0014



**Muhiddinov Bahodir
Fahriddinovich**

K.f.d., professor, Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti Kimyoviy texnologiya
kafedrasini, Navoiy, O'zbekiston
E-mail: muhiddinov.b@mail.ru
ORCID ID: 0009-0006-2411-2914
Science ID: DBX-0525-0007



**Jo'rayev Shoxruh
To'liqinovich**

T.f.d., professor, Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti Agromuhandislik va
kommunikatsion texnologiyalar
fakulteti dekani, Navoiy,
O'zbekiston
E-mail: shoxa299090@gmail.com
ORCID ID: 0009-0002-0839-5994
Science ID: FBX-0325-0004



**Shokirov Ravshan
Qahramonovich**

Tayanch doktorant, Navoiy davlat
konchilik va texnologiyalar
universiteti Agronomiya kafedrasini,
Navoiy, O'zbekiston
E-mail:
shokirovravshan178@gmail.com
ORCID ID: 0009-0008-8218-7599
Science ID: MBX-1125-0014

Annotatsiya. Ushbu maqolada sof, chiqindi, qayta ishlangan hamda plastifikatsiyalangan poliuretan namunalari termogravimetrik tahlil va differensial skanerlovchi kalorimetriya usullari yordamida tadqiq etilgan. Tadqiqotning asosiy maqsadi poliuretan chiqindilarini qayta ishlash va plastifikatsiyalash jarayonlarining polimerning termik barqarorligi hamda molekulyar tuzilishiga ta'sirini aniqlash va uning xossalari sof poliuretan namunasiga nisbatan saqlab qolish imkoniyatini baholashdan iborat. Termogravimetrik tahlil natijalari barcha namunalarda termik destruksiyaning ikki yoki uch bosqichda sodir bo'lishini ko'rsatdi. Bunda ($-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$), karbonil ($-\text{COO}-$) va efir ($-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$) bog'larining uzilishi, polimer asosiy zanjirining parchalanishi, CO_2 , CO , NH_3 , suv bug'i va boshqa uchuvchan organik mahsulotlarning hosil bo'lishi hamda karbonlangan qoldiqlarning termik oksidlanishi kuzatildi. Shuningdek, toza, chiqindi, 4,4-metilendifenildiizotsianat oligomeri asosida qayta ishlangan hamda etilenglikol va glitserin yordamida plastifikatsiyalangan poliuretan namunalari harorat ta'sirida massa yo'qotilishi, parchalanish tezligi, parchalanish haroratining boshlanishi va tugashi kabi termik xususiyatlari o'rganildi. Barcha namunalar uchun umumiy massa va tadqiqot sharoitlarining bir xilligi ta'minlangan. Olingan natijalar poliuretan chiqindilarini qayta ishlash orqali fizik-mexanik xossalari yaxshilangan polimer materiallarini olish imkoniyatini ilmiy jihatdan asoslaydi.

Kalit so'zlar: 4,4-metilendifenildiizotsianat, poliefir, poliuretan, poliuretan chiqindilari, termogravimetrik tahlil, differensial skanerlovchi kalorimetriya, termik destruksiya, uretan bog'lari, plastifikatsiya, glitserin, etilenglikol, qayta ishlash, termik barqarorlik, kompozitsion materiallar, massa yo'qotilishi, parchalanish tezligi.

Received: 19.08.2026

Accepted: 19.09.2026

Issue publication: 28.09.2026

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ ЧИСТОГО, ОТРАБОТАННОГО, ПЕРЕРАБОТАННОГО И ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ПОЛИУРЕТАНА

**Шодиев Аслиддин
Фахриддин угли**

PhD по техническим наукам,
заместитель декана факультета
агроинженерии и
коммуникационных технологий
Навоийского государственного
горно-технологического
университета, Навои,
Узбекистан

**Мухиддинов Баходир
Фахриддинович**

Кандидат химических наук,
профессор кафедры химической
технологии Навоийского
государственного горно-
технологического университета,
Навои, Узбекистан

**Жураев Шохрух
Тулкинович**

Доктор технических наук,
профессор, декан факультета
агроинженерии и
коммуникационных технологий
Навоийского государственного
горно-технологического
университета, Навои,
Узбекистан

**Шокиров Равшан
Кахрамонович**

Базовый докторант кафедры
агрономии Навоийского
государственного горно-
технологического университета,
Навои, Узбекистан

Аннотация. В статье исследованы образцы чистого, отходного, переработанного и пластифицированного полиуретана с использованием методов термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии. Основной целью исследования являлось определение влияния процессов переработки и пластификации отходов полиуретана на термическую стабильность и молекулярную структуру полимера, а также оценка возможности сохранения его свойств по сравнению с исходным образцом полиуретана. Результаты термогравиметрического анализа показали, что термическая деструкция всех исследованных образцов протекает в две или три стадии. При этом наблюдаются разрыв связей ($-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$), карбонильных ($-\text{COO}-$) и эфирных ($-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$) связей, разрушение основной полимерной цепи, образование CO_2 , CO , NH_3 , водяного пара и других летучих органических продуктов, а также термическое окисление карбонизированных остатков. Исследованы такие термические характеристики образцов чистого, отходного, переработанного на основе олигомера 4,4-метиленидифенилдиизоцианата и пластифицированного с использованием этиленгликоля и глицерина полиуретана, как потеря массы под воздействием температуры, скорость разложения, начальная и конечная температуры разложения. Для всех образцов обеспечивались одинаковые общая масса и условия проведения исследований. Полученные результаты научно обосновывают возможность получения полимерных материалов с улучшенными физико-механическими свойствами посредством переработки отходов полиуретана.

Ключевые слова: 4,4-метиленидифенилдиизоцианат, полиэфир, полиуретан, отходы полиуретана, термогравиметрический анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия, термическая деструкция, уретановые связи, пластификация, глицерин, этиленгликоль, переработка, термическая стабильность, композиционные материалы, потеря массы, скорость разложения.

COMPARATIVE THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS OF VIRGIN, WASTE, RECYCLED, AND PLASTICIZED POLYURETHANE SAMPLES

**Shodiev Asliddin
Fakhriddin ugli**

PhD in Technical Sciences, Deputy
Dean of the Faculty of
Agroengineering and
Communication Technologies,
Navoi State University of Mining
and Technologies, Navoi,
Uzbekistan

**Muhiddinov Bahodir
Fakhriddinovich**

Candidate of Chemical Sciences,
Professor, Department of Chemical
Technology, Navoi State University
of Mining and Technologies, Navoi,
Uzbekistan

**Jurayev Shokhrux
Tulkinovich**

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Dean of the Faculty of
Agroengineering and
Communication Technologies,
Navoi State University of Mining
and Technologies, Navoi,
Uzbekistan

**Shokirov Ravshan
Kahramonovich**

Basic Doctoral Student,
Department of Agronomy, Navoi
State University of Mining and
Technologies, Navoi, Uzbekistan

Abstract. This article presents a study of pure, waste, recycled, and plasticized polyurethane samples using thermogravimetric analysis and differential scanning calorimetry. The main objective of the study was to determine the effect of polyurethane waste recycling and plasticization processes on the thermal stability and molecular structure of the polymer and to evaluate the possibility of retaining its properties compared with the pure polyurethane sample. The thermogravimetric results showed that thermal degradation of all investigated samples occurs in two or three stages. The process involves the cleavage of ($-NH-CO-O-$), carbonyl ($-COO-$), and ether ($-C-O-C-$) bonds, degradation of the main polymer chain, formation of CO_2 , CO , NH_3 , water vapor, and other volatile organic products, as well as thermal oxidation of carbonized residues. The thermal characteristics of pure, waste, recycled polyurethane based on a 4,4-methylenediphenyl diisocyanate oligomer, and polyurethane plasticized using ethylene glycol and glycerin were investigated, including mass loss under temperature exposure, degradation rate, and the initial and final degradation temperatures. The total sample mass and experimental conditions were kept identical for all five samples. The obtained results scientifically substantiate the possibility of producing polymer materials with improved physical and mechanical properties through the recycling of polyurethane waste.

Keywords: 4,4-methylenediphenyl diisocyanate, polyester, polyurethane, polyurethane waste, thermogravimetric analysis, differential scanning calorimetry, thermal degradation, urethane bonds, plasticization, glycerin, ethylene glycol, recycling, thermal stability, composite materials, mass loss, degradation rate.

Kirish. Hozirgi vaqtda sanoat korxonalarini rivojlantirishda polimerlar texnologiyasi, xususan, poliuretanlar optimal fizik-mexanik xususiyatlari, jumladan, yuqori mustahkamligi, adgeziyalanishi, yeyrilishga bardoshliligi va kimyoviy reagentlar ta'siriga chidamliligi bilan alohida o'rin tutadi. Bugungi kunda ushbu materiallar samolyotsozlik, qurilish, mashinasozlik va tibbiyot kabi strategik sohalarida keng qo'llanilmoqda. Biroq poliuretan qoplamali sanoat detallarini ishlab chiqarish va ulardan foydalanish hajmining ortishi bilan birga, poliuretan chiqindilari ham hosil bo'lmoqda. Ushbu chiqindilarni qayta ishlash va ikkilamchi xomashyodan yuqori sifatli mahsulotlar olish masalasi ekologik va iqtisodiy jihatdan dolzarb muammoga aylandi.

Poliuretanlarning xossalari ularning molekulyar tuzilishida mavjud segmentlar nisbatiga bog'liq. Poliuretan hosil qiluvchi zanjir uzunligi, kristallik darajasi, molekulyar massasi, zanjirdagi to'ring mavjudligi, zichligi va tabiati kabi xilma-xil xususiyatlaridan foydalanish ularni keng qo'llash imkonini beradi [1]. Ushbu polimerlarning termik xossalarini o'rganish ularni qo'llash sohalarini yanada kengaytiradi. Ular lak-bo'yoq qoplamalari, yelimlar (kley), germetiklar, izolyatorlar, prokladkalar, poyabzal tag qismlari va boshqa sohalarida ishlatiladi.

Jahon bozori tahliliga ko'ra, poliuretan

iste'moli yaqin kelajakda har yili 6,8 foizga o'sishi kutilmoqda. Natijada bozor hajmi 7,8 milliard dollarga yetishi bashorat qilingan. Ushbu summaning 2,7 milliard dollari poliuretan asosidagi yopishqoq moddalar va germetiklarga, qolgan qismi esa suyuq hamda ko'pikli poliuretan bozoriga to'g'ri keladi.

Tadqiqotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, haroratning o'zgarishi poliuretanning parchalanish temperaturasi, massa yo'qotilishi, parchalanish tezligi va qattiq qoldiq miqdori kabi xususiyatlariga bevosita ta'sir ko'rsatadi [5]. Toza, chiqindi, qayta ishlangan va plastifikatsiyalangan poliuretan materiallarining termik xossalari ularning molekulyar tuzilishi hamda zanjirlararo bog'lanish darajasiga bog'liqligini ko'rsatdi [2].

Turli holatdagi toza, chiqindi, qayta ishlangan va plastifikatsiyalangan poliuretan namunalari termogravimetrik tahlildan o'tkazildi. Tadqiqot davomida uretan ($-NH-CO-O-$), karbonil va efir bog'larining uzilishi, massa yo'qotilishi hamda parchalanish tezligi kabi xususiyatlar o'rganildi. Toza poliuretan namunasida termik parchalanish $260,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ da, chiqindi poliuretan namunasida $268,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ da, qayta ishlangan poliuretan namunasida esa $293,4^{\circ}\text{C}$ da boshlanganligi aniqlandi. Plastifikatsiyalangan poliuretan namunalarida ushbu ko'rsatkichlar mos ravishda $184,0^{\circ}\text{C}$ va $244,3^{\circ}\text{C}$ gacha pasaygan.

Adabiyotlar tahlili va metodlar. Ushbu ilmiy tadqiqot ishida poliuretan chiqindilarini qayta ishlash va ularning termik barqarorligini aniqlash masalalari o'rganildi. Termoreaktiv tuzilishga ega poliuretanlarni mexanik qayta ishlash usullari orqali qayta ishlash samarasiz ekanligi ularni kimyoviy qayta ishlash, xususan, glikoliz, aminoliz, gidroliz va plastifikatsiyalash usullarini rivojlantirish zarurligini ko'rsatadi.

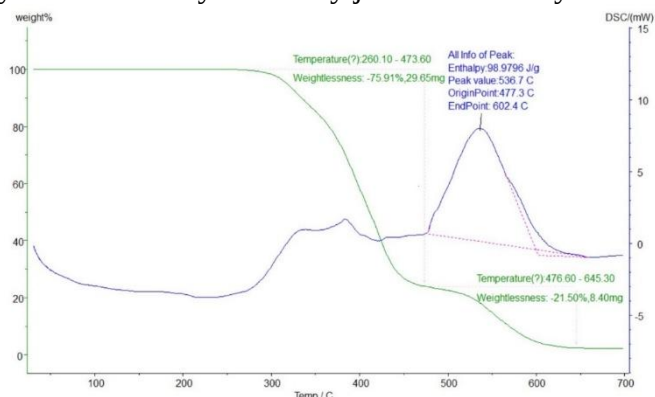
Adabiyotlarda poliuretanlarning termik xossalarini tadqiq etishda termogravimetrik tahlil (TGA) va differensial skanerlovchi kalorimetriya (DSC) eng ishonchli usullar sifatida e'tirof etilgan. Ko'pgina tadqiqotlarda poliuretanlarning termik destruksiya ikki yoki uch bosqichda sodir bo'lishi aniqlangan. Birinchi bosqich odatda 250–350°C oralig'ida uretan bog'larining (–NH–CO–O–) parchalanishi bilan tavsiflanadi. Ikkinchi bosqich 350–450°C oralig'ida poliefir segmentlari, shuningdek, karbonil (–COO–) va efir (–C–O–C–) bog'larining uzilishi natijasida polimerning asosiy zanjiri parchalanishi bilan kechadi. Yakuniy bosqich esa 450–650°C oralig'ida karbonlangan qoldiqning termo-oksidlanishi va karbonli strukturalarning destruksiya bilan tavsiflanadi. Poliuretanlarning termik parchalanishi davomida, asosan, CO₂, CO, NH₃, H₂O bug'i, shuningdek, izosiyanatlar, aminlar va boshqa past molekulyar uchuvchan organik birikmalar hosil bo'ladi. Ushbu gazlarning hosil bo'lish intensivligi polimerning kimyoviy tuzilishi, qattiq va yumshoq segmentlar nisbati hamda sintez texnologiyasiga bevosita bog'liq.

Ushbu tadqiqotda 4,4'-metilendifenildiizosiyanat asosida qayta sintez qilingan poliuretanlarning termik barqarorligi dastlabki materialnikiga yaqin ekanligi ko'rsatildi. Shuningdek, etilenglikol va glitserin kabi past molekulyar massali plastifikatorlardan foydalanish polimerning makromolekulyar harakatchanligini oshirishi, ichki kuchlanishlarni kamaytirishi hamda qayta ishlangan materiallarning fizik-mexanik xossalarini yaxshilashi aniqlandi. Plastifikator miqdori 1–3% oralig'ida tanlanganda termik barqarorlik deyarli saqlanib qolishi bilan birga, elastiklik va deformatsiyalanish qobiliyatining ortishi kuzatildi.

Tajriba jarayonida toza, chiqindi, qayta ishlangan va plastifikatsiyalangan poliuretan

namunalari TG–DSC usulida tahlil qilindi. Har bir namunaning massasi 8–12 mg qilib tayyorlandi. Tahlillar 50–700°C harorat oralig'ida, 10°C/min qizdirish tezligida va 50 ml/min sarf tezligiga ega azot atmosferasida olib borildi. TG egri chiziqlari asosida parchalanishning boshlanish harorati, massa yo'qotilishi va qoldiq miqdori, DSC egri chiziqlari asosida esa maksimal issiqlik oqimi va entalpiya (ΔH) aniqlandi [3, 4].

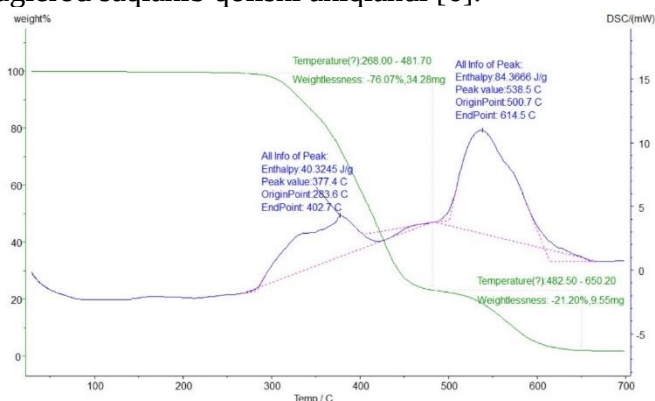
Natijalar. Poliuretan namunalarning termik xossalarini aniqlash maqsadida toza poliuretan (PU-1), chiqindi poliuretan (PU-2), qayta ishlangan poliuretan (PU-3) hamda plastifikatsiyalangan poliuretan namunalari (PU-4 va PU-5) termogravimetrik (TG) va differensial skanerlovchi kalorimetriya (DSC) usullarida tahlil qilindi. Olingan natijalar poliuretanlarning termik parchalanish mexanizmi, molekulyar tuzilishidagi o'zgarishlar va qayta ishlash hamda plastifikatsiyalash jarayonlarining termik barqarorlikka ta'sirini aniqlash imkonini berib uning natijalari Asosiy termik destruksiya 184–293°C oralig'ida boshlanib PU-1 namunasida parchalanish 260,1°C, PU-2 268,0°C, PU-3 293,4°C, PU-4 va PU-5larning parchalanishning boshlanish harorati 184,0°C va 244,3°C larga to'g'ri kelishi aniqlandi. Qayta ishlangan poliuretan eng yuqori termik barqarorlikni namoyon etgan bo'lsa, plastifikatsiyalangan polimer segmentlarining harakatchanligini oshirib, dastlabki termik destruksiya haroratini pasaytirdi[5]. Olingan natijalar poliuretan chiqindilarini qayta ishlash orqali yuqori issiqlik va yedrilishga chidamli kompozitsion materiallar yaratish imkoniyatini ilmiy jihatdan ifodalaydi.



1-rasm. Toza poliuretan namunasining termogravimetrik tasviri.

Yuqoridagi natijalar asosida toza poliuretan

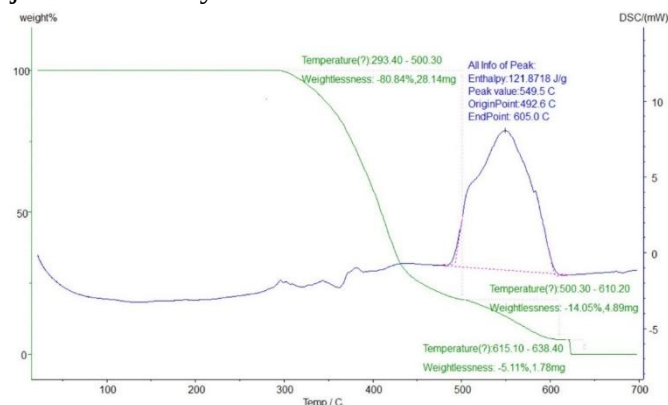
namunasi 260°C gacha yuqori termik barqarorlikka ega ekanligi aniqlandi. Asosiy termik destruksiya 260–474°C oralig'ida sodir bo'lib, bunda namuna massasining 75,91% ga kamayishi kuzatildi. Ushbu jarayon uretan (–NH–CO–O–), poliol va efir bog'larining uzilishi, shuningdek, CO₂, CO, NH₃ va boshqa uchuvchan mahsulotlarning hosil bo'lishi bilan tavsiflanadi. 476–645°C oralig'ida karbonlangan qoldiqning oksidlanishi natijasida massa yana 21,50% ga kamaydi. DSC egri chizig'ida 536,7 °C da kuzatilgan maksimum pik va 98,98 J/g entalpiya qiymati aromatik poliuretan qoldiqlarining chuqur termik parchalanishini ko'rsatdi. Umumiy massa yo'qotilishi 97% dan ortiq bo'lib, oxirgi qattiq qoldiq tarkibida 2–3% uglerod saqlanib qolishi aniqlandi [6].



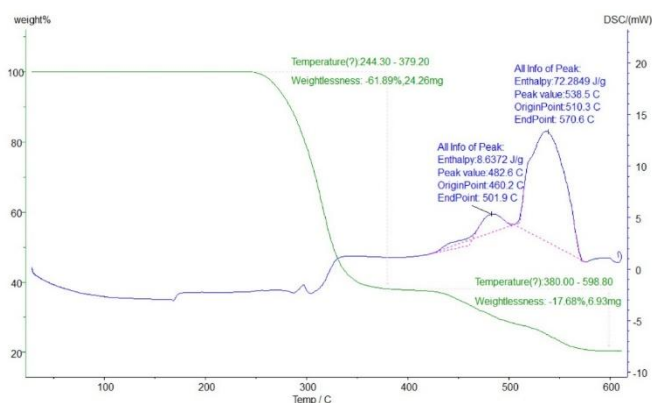
2-rasm. Chiqindi poliuretan namunasining termogravometrik tasviri.

Yuqoridagi rasmda chiqindi poliuretan namunasi 268°C gacha termik barqarorlikka ega ekanligini ko'rishimiz mumkin. Asosiy termik destruksiya 268,0–481,7°C oralig'ida sodir bo'lib, bunda namuna massasining 76,07% ga kamaygani aniqlandi. Ushbu bosqich uretan (–NH–CO–O–), ester va efir bog'larining uzilishi, shuningdek, CO₂, CO, NH₃ va boshqa uchuvchan mahsulotlarning ajralishi bilan tavsiflanadi. DSC egri chizig'ida 377,4°C da kuzatilgan birinchi endotermik pik (40,32 J/g) yumshoq segmentlar va uretan bog'larining parchalanishini, 538,5°C dagi asosiy pik (84,37 J/g) esa karbonlangan aromatik qoldiqlarning chuqur termik destruksiyasini ifodalaydi. 482,5–650,2°C oralig'ida qo'shimcha 21,20% massa yo'qolib, umumiy massa yo'qotilishi 97 % dan ortiq qiymatga yetadi [7]. Toza poliuretan bilan solishtirilganda, parchalanish haroratining biroz yuqorilashi va entalpiyaning kamayishi

chiqindi poliuretan tarkibida ekspluatatsiya yoki eskirish natijasida hosil bo'lgan ko'ndalang bog'lanishlar hamda karbonlangan strukturalar mavjudligini ko'rsatadi. Bu natijalar chiqindi poliuretan namunasining termik qayta ishlash yoki piroliz jarayonlariga yaroqli ekanligini ilmiy jihatdan asoslaydi.



3-rasm. Qayta ishlangan poliuretan namunasining termogravometrik tasviri.

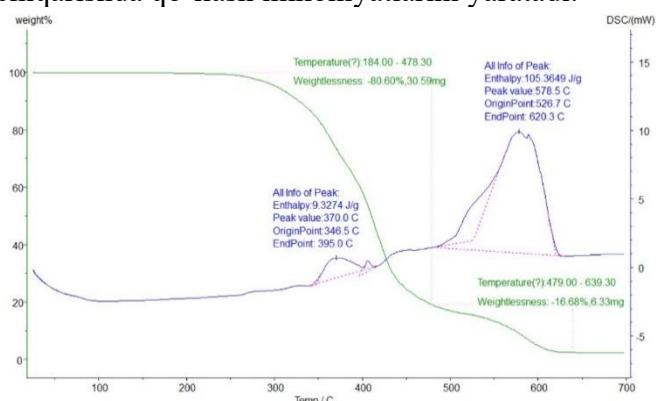


4-rasm. Plastifikatsiyalangan poliuretan namunasining termogravometrik tasviri.

TG–DSC tahlillari qayta ishlangan poliuretan namunasining termik barqarorligi toza va chiqindi poliuretan namunalari bilan solishtirganda yaxshilanganligini ko'rsatadi. Buning asosiy sababi qayta ishlash jarayonida 4,4-metilendifenildiizosianat oligomerining kiritilishi va polimerlanish natijasida yangi bog'larning hosil bo'lishidir. Ushbu bog'larni uzish uchun qo'shimcha energiya talab qilinishi aniqlandi. Parchalanishning 293,4°C da boshlanishi va asosiy destruksiyaning 293,4–500,3°C oralig'ida sodir bo'lishi qayta ishlash natijasida hosil bo'lgan polimer tuzilmasining issiqlikka chidamliligi ortganini tasdiqlaydi. 549,5°C dagi DSC

maksimumi va 121,87 J/g entalpiya qiymati karbonlangan strukturalarning parchalanishi uchun ko'proq energiya talab qilinishini ko'rsatadi [8]. Bu natijalar qayta ishlangan poliuretanning yuqori haroratlarda ishlaydigan buyumlar, abraziv muhitda xizmat qiluvchi detallar va yeyrilishga bardoshli materiallar ishlab chiqarishda samarali qo'llanilishi mumkinligini ilmiy jihatdan asoslaydi.

Poliuretan materialini plastifikatsiyalashda plastifikator sifatida etilenglikol qo'llanilgan bo'lib, uning termik xossalari tahlili ikki asosiy bosqichda kechishini ko'rishimiz mumkin. Bunda 244,3–379,2°C oralig'ida uretan, poliol va efir bog'larining uzilishi natijasida namunaning massasida 61,89% ga kamayish kuzatilgan. Keyingi 380,0–598,8°C oralig'ida esa karbonlangan aromatik qoldiqlarning parchalanishi hisobiga massa qo'shimcha ravishda 17,68% ga kamaygani aniqlandi. DSC egri chizig'ida 482,6°C (8,64 J/g) va 538,5°C (72,28 J/g) haroratlarda kuzatilgan o'zgarishlar, mos ravishda, oraliq karbonlangan mahsulotlarning hosil bo'lishi va ularning chuqur termik destruksiyasini ifodalaydi. Grafikda 600°C da taxminan 17,68% qattiq qoldiqning saqlanib qolishi plastifikatsiyalangan poliuretan tarkibida karbonlangan faza yoki noorganik komponentlar nisbatan yuqori ulushga ega ekanligini ko'rsatadi [9]. Bu natijalar ushbu materialni yuqori haroratli ekspluatatsiya sharoitlarida hamda yeyrilishga chidamli kompozitsion materiallar ishlab chiqarishda qo'llash imkoniyatlarini yaratadi.



5-rasm. Plastifikatsiyalangan poliuretan namunasining termogravometrik tasviri.

Ushbu namunada plastifikator sifatida glitserin qo'llanilgan bo'lib, uning namunaning termik xususiyatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlandi. Parchalanishning 184,0°C da boshlanishi

plastifikatorning past molekulyar fraksiyalari va yumshoq segmentlarining dastlabki termik parchalanishi bilan bog'liq. 184,0–478,3°C oralig'ida namuna massasining 80,60% ga kamayishi kuzatildi; ushbu bosqichda uretan, poliol hamda efir bog'larining uzilishi aniqlandi. DSC egri chizig'ida 370,0°C dagi kichik pik (9,33 J/g) plastifikatorning parchalanishini, 578,5°C dagi asosiy pik (105,36 J/g) esa karbonlangan aromatik qoldiqlarning chuqur termik destruksiyasini ko'rsatadi. 479,0–639,3°C oralig'ida qo'shimcha 16,68% massa yo'qotilishi natijasida namunaning deyarli barcha organik qismi parchalanadi [10]. Ushbu natijalar plastifikator poliuretanning past haroratdagi segmentlarini harakatchanroq qilish bilan birga, yuqori haroratlarda hosil bo'ladigan karbonlangan qoldiqning barqarorligini ham saqlab qolishini ko'rsatadi. Bu esa plastifikatsiyalangan poliuretan qayta ishlash texnologiyalarida elastik va yeyrilishga chidamli material sifatida foydalanish mumkinligini ilmiy jihatdan asoslaydi.

1-jadval

Poliuretan namunalarining asosiy termik parametrlari

№	Temperatura, °C	Massa yo'qotilishi, %					Parchalanish tezligi, mg/min					Sarlafidigan energiya miqdori (kJ/g)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	50	1,925	1,310	4,87	3,33	2,32	0,126	0,122	0,101	0,133	0,133	1,43	1,33	1,89	1,40	1,27
2	100	3,611	2,911	6,63	6,87	3,81	0,461	0,402	0,320	0,312	0,308	2,88	2,82	3,12	2,62	1,98
3	150	6,311	5,889	14,82	11,43	5,71	0,564	0,631	0,452	0,684	0,567	2,48	2,36	3,86	2,48	2,44
4	200	9,101	8,932	21,36	17,07	15,80	0,656	0,696	0,511	0,736	0,613	2,61	1,98	4,20	2,71	3,01
5	250	29,72	13,02	30,19	19,98	21,21	3,021	3,023	2,017	2,021	2,311	3,23	3,12	3,41	3,33	4,43
6	300	38,33	17,10	36,42	27,33	35,70	3,233	3,321	2,783	3,238	3,237	6,98	6,62	7,36	3,98	6,62
7	350	36,64	20,21	43,87	34,37	47,43	3,884	3,891	3,012	3,983	3,281	7,62	7,09	8,03	6,32	7,32
8	400	63,22	41,29	59,90	61,89	54,22	4,114	4,198	3,856	6,211	6,281	7,52	7,63	8,76	7,58	7,56
9	450	75,91	57,56	74,08	50,73	68,77	3,884	4,253	4,976	5,076	8,12	8,23	8,07	8,12	6,28	
10	500	68,52	78,11	80,84	44,96	80,60	1,999	1,823	2,523	2,991	3,081	6,23	3,08	6,86	6,23	4,03
11	550	33,41	76,07	67,42	36,87	71,43	1,884	1,843	2,012	1,875	1,875	4,98	2,88	3,42	4,68	3,12
12	600	39,67	91,18	36,99	21,14	39,63	1,499	1,491	1,876	1,699	1,549	2,59	2,08	4,34	2,59	2,28
13	650	21,50	21,50	20,01	17,68	16,68	1,801	1,403	1,564	1,433	1,431	2,12	1,86	3,12	2,14	1,96
14	700	21,49	21,20	20,01	17,58	16,24	1,117	1,278	1,308	1,103	1,103	1,78	1,05	2,07	1,18	1,13

Bu yerda: PU-1 — toza, PU-2 — chiqindi, PU-3 — qayta ishlangan, PU-4 va PU-5 — plastifikatsiyalangan poliuretan namunalari.

Yuqoridagi jadval asosida quyidagi xulosaga kelishimiz mumkin: TG–DSC tahlillari poliuretan namunalarining termik xossalari ularning tarkibi va ishlov berish usuliga sezilarli darajada bog'liq ekanligini ko'rsatdi. Qayta ishlangan poliuretan eng yuqori termik barqarorlikka (293,4°C) va eng katta entalpiyaga (121,87 J/g) ega bo'lib, bu qayta ishlash jarayonida polimer tuzilmasining mustahkamlanganligini tasdiqlaydi. Toza va chiqindi poliuretan namunalari o'xshash termik xossalarga ega bo'lib, chiqindi poliuretanning qayta ishlash uchun istiqbolli xomashyo ekanligini ko'rsatadi. Plastifikatsiyalangan poliuretanlar dastlabki parchalanishni nisbatan past haroratlarda boshlasada, yuqori haroratlarda karbonlangan qoldiqning termik barqarorligini oshiradi [11]. Umuman

olganda, qayta ishlash va plastifikatsiya poliuretanlarning termik xossalarini maqsadli ravishda boshqarish imkonini beradi hamda ularni yuqori yedirilishga va issiqlikka chidamli materiallar ishlab chiqarishda qo'llash uchun ilmiy asos yaratadi.

Muhokama. Olib borilgan ilmiy tadqiqot ishida toza poliuretan (PU-1), poliuretan chiqindisi (PU-2), 4,4-metilendifenildizosiyanat oligomeri asosida qayta ishlangan poliuretan (PU-3), qayta ishlangan ikkinchi namuna (PU-4), shuningdek, etilenglikol va glitserin bilan plastifikatsiyalangan poliuretan (PU-5) namunalarining termogravimetrik tahlil natijalari keltirilgan. Tahlil natijalariga ko'ra, 50°C haroratda barcha namunalarda massa yo'qotilishi 1,51–4,87% oralig'ida kuzatildi. Eng yuqori massa kamayishi PU-3 namunasida (4,87%), eng past qiymat esa PU-2 namunasida (1,51%) qayd etildi.

Mazkur bosqich fizik adsorbsiyalangan namlik hamda past molekulyar massali uchuvchan komponentlarning bug'lanishi bilan izohlanadi. Ushbu haroratda parchalanish tezligi 0,102–0,135 mg min⁻¹, issiqlik effekti esa 1,27–1,89 $\mu\text{V}\cdot\text{s mg}^{-1}$ ni tashkil etdi. Harorat 200–300°C gacha oshirilganda poliuretanlarning asosiy kimyoviy bog'larida termik parchalanish jarayoni boshlandi. 250°C haroratda massa yo'qotilishi PU-1 uchun 29,72%, PU-2 uchun 15,02%, PU-3 uchun 30,19%, PU-4 uchun 19,98% va PU-5 uchun 21,21% ni tashkil etdi. Ushbu bosqichda uretan (–NH–CO–O–) guruhlarining dissotsiatsiyasi natijasida izosiyanat va spirt fragmentlari hosil bo'lib, CO₂ hamda boshqa uchuvchan mahsulotlar ajralib chiqishi kuzatiladi [12].

300–400°C oralig'i barcha namunalarda asosiy destruksiya bosqichi sifatida namoyon bo'ldi. 350°C haroratda PU-1 namunasi 56,64%, PU-3 — 45,87%, PU-4 — 54,37%, PU-5 esa 47,45 % massa yo'qotgan bo'lsa, chiqindi poliuretan (PU-2) atigi 30,21% massa yo'qotdi. 400°C haroratda massa kamayishi PU-1 uchun 63,22%, PU-2 uchun 41,29 %, PU-3 uchun 59,90%, PU-4 uchun 61,89% va PU-5 uchun 54,22% ni tashkil etdi. Mazkur bosqich polimerning asosiy zanjiridagi karbonil (–COO–) hamda efir (–C–O–C–) bog'larining uzilishi bilan tavsiflanadi. DTG natijalari ham aynan shu harorat oralig'ida parchalanish tezligining

maksimal qiymatlarini ko'rsatdi. 400°C haroratda parchalanish tezligi PU-1 namunasida 4,114 mg min⁻¹, PU-2 namunasida 4,198 mg min⁻¹, PU-3 namunasida 3,856 mg min⁻¹, PU-4 namunasida 6,211 mg min⁻¹, PU-5 namunasida esa 6,281 mg min⁻¹ ga yetdi.

Plastifikatsiyalangan namunalarda parchalanish tezligining yuqoriroq bo'lishi plastifikator molekularining makromolekulyar segmentlar o'rtasidagi o'zaro ta'sirni kamaytirishi hamda zanjirlarning harakatchanligini oshirishi bilan izohlanadi. 450–550°C oralig'ida karbonlangan qoldiqning termo-oksidlanishi kuzatildi. 500°C haroratda massa yo'qotilishi PU-1 uchun 68,52%, PU-2 uchun 78,11%, PU-3 uchun 60,84%, PU-4 uchun 44,96% va PU-5 uchun 80,60% ni tashkil etdi. Ayniqsa, PU-4 namunasida massa yo'qotilishining nisbatan pastligi qayta tiklangan poliuretan tarmog'ining termik barqarorligi yuqoriroq ekanligini ko'rsatadi.

DSC natijalariga ko'ra, issiqlik oqimi ham harorat oshishi bilan ortib bordi. 300 °C haroratda issiqlik effekti 5,98–7,56 $\mu\text{V}\cdot\text{s mg}^{-1}$, 400°C haroratda esa 7,63–8,76 $\mu\text{V}\cdot\text{s mg}^{-1}$ ni tashkil etdi [7]. Umuman olganda, olingan natijalar 4,4-MDI oligomeri asosida qayta ishlangan hamda etilenglikol va glitserin yordamida plastifikatsiyalangan poliuretanlarning termik xossalari dastlabki poliuretan xossalariga yaqinligini ko'rsatdi. Ayniqsa, PU-4 namunasida yuqori haroratlarda massa yo'qotilishining pastligi va qoldiqning nisbatan yuqori saqlanishi qayta ishlash jarayonida polimer tarmog'ining samarali tiklanganligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, plastifikatsiyalangan namuna (PU-5) segmentlar harakatchanligining ortishi sababli destruksiya tezligining yuqoriroq qiymatlarini namoyon etdi.

Xulosa. Olib borilgan termogravimetrik va differensial skanerlovchi kalorimetriya tahlillari natijasida toza poliuretan, chiqindi poliuretan, qayta ishlangan poliuretan hamda ikkita plastifikatsiyalangan poliuretan namunalarining termik xossalari aniqlandi.

Birinchi bosqich 184–293°C oralig'ida boshlanib, poliuretan makromolekulasidagi uretan (–NH–CO–O–), karbonil (–COO–) va efir (–C–O–C–) bog'larining uzilishi bilan izohlandi. Mazkur bosqich umumiy massa yo'qotilishining asosiy qismini, ya'ni 61,89–80,84% ni tashkil etdi.

Ikkinchi bosqich esa 380–650°C oraligʻida kuzatildi. Qayta ishlangan poliuretan namunasida qoʻshimcha uchinchi bosqich (615–638°C) qayd etilib, bu yuqori darajada karbonlangan qoldiqlarning sekin parchalanishi bilan izohlandi.

Plastifikatsiyalangan namunalarda asosiy DSC piki 578,5°C gacha siljigan. Bu plastifikatorning karbonlanish jarayoniga ham taʼsir koʻrsatishi natijasida yuqori haroratlarda hosil boʻlgan qoldiqning barqarorligi oshganini koʻrsatdi. Poliuretan namunalarining termik parchalanishi, avvalo, uretan bogʻlarining dissotsiatsiyasi, keyin polioli va efir segmentlarining uzilishi, yakuniy bosqichda esa aromatik uglevodorodlarning karbonlanishi va oksidlanishi orqali amalga oshishi

aniqlandi.

Qayta ishlash jarayonida hosil boʻlgan yangi molekulyar bogʻlanishlar termik barqarorlikni oshirgan, plastifikator qoʻshilishi esa polimerning elastikligini oshirib, past haroratlarda destruksiya jarayonini tezlashtirgan. Olib borilgan tahlillar qayta ishlangan poliuretan namunasi termik barqarorlik, parchalanish harorati va issiqlik yutish qobiliyati boʻyicha eng yuqori koʻrsatkichlarga ega ekanini koʻrsatdi. Shuningdek, chiqindi poliuretan namunasining termik xossalari toza poliuretanga juda yaqin ekani, plastifikatsiyalangan poliuretan namunalari esa yuqori elastiklikni hamda yuqori haroratlarda yetarli darajadagi termik barqarorlikni saqlab qolishi aniqlandi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR ROʻYXATI

- [1] Islomova, N. A. Q., & Qamariddin, O. (2022). Yuqori molekulyar birikmalarni fizik-kimyoviy tadqiqot usullari asosida oʻrganish. *Academic Research in Educational Sciences*, 3(2), 877–884.
- [2] Mendiburu-Valor, E., et al. (2023). Thermoset polyurethanes from biobased and recycled components. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(11), 4946–4959.
- [3] Eshmatov, A. M., et al. (2021). Dispers toʻldiruvchili polimer-polimer komplekslar asosidagi kompozitsion materiallar. *Academic Research in Educational Sciences*, 2(2), 334–341.
- [4] Mârşolea, A. C., et al. (2023). Design of polyurethane composites obtained from industrial plastic wastes, pyrite and red mud. *Construction and Building Materials*, 405, 133319.
- [5] Лутфуллаев, С. Ш., & Бекназаров, Э. М. (2021). Исследование физико-химических и механических свойств полимеров из промышленных отходов при их вторичной переработке. *Universum: технические науки*, 12(93). <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/12769>
- [6] Мазурин, В. Л. (2013). Полиуретан как конструкционный материал XXI века. *Глобальная энергия*, 2(171), 165–170.
- [7] Бакирова, И. Н., & Минеева, Т. А. (2024). Синтез термопластичного полиуретана с использованием в качестве удлинителя цепи ароматического диола и разработка на его основе клеевых композиций. *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*, 67(11), 106–113.
- [8] Shodiyev, A., Mukhiddinov, B., & Kiyomov, S. (2022). Effect of change of polyethropoliol amount on the physical-mechanical properties of thermoreactive polyurethane. *Universum: технические науки*, 10(103). <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14396>
- [9] Abu-Jdayil, B., et al. (2022). Utilization of polyurethane foam dust in development of thermal insulation composite. *Buildings*, 12(2), 126.
- [10] Xoʻjaqulov, K. R., et al. (2023). Ikkilamchi polimer chiqindilarini granulalash va ularni qayta ishlash. *Science and Education*, 4(6), 418–423.
- [11] Shaker, A., et al. (2023). Thermo-mechanical characterization of electrospun polyurethane/carbon-nanotubes nanofibers: A comparative study. *Scientific Reports*, 13(1), 17368.
- [12] Захаров, А. Е. (2025). Термогравиметрический анализ наномодифицированного материала для внешнего огнезащитного слоя оболочек полимерных эластичных резервуаров. *Современные проблемы гражданской защиты*, 4(57), 19–28.

Maqolaga iqtibos keltirish | Как цитировать статью | How to cite this article

Shodiyev, A. F., Mukhiddinov, B. F., Jo'rayev, S. T., & Shokirov, R. Q. (2026). Sof, chiqindi, qayta ishlangan va plastifikatsiyalangan poliuretan namunalarining qiyosiy termogravimetrik tahlili. Sanoatda raqamli texnologiyalar, 4(3). <https://doi.org/10.70769/3030-3214.SRT.4.3.2026.38>
