



POLIMER OLTINGUGURT OLIISH VA INING IQ-SPEKROSKOPIK VA TERMIK TAHLILLARI

Mahmadullaev Jasurbek Odiljon o‘g‘li

Toshkent kimyo texnologiya ilmiy-tadqiqot institut doktoranti

Djalilov Abdulahat Turapovich

O‘zR fanlar akademiyasi akademigi, Kimyo fanlar doktor, professor

Toshkent kimyo texnologiya ilmiy tadqiqot instituti direktori.

Sottiqulov Elyor Sotimboyevich

*Texnika fanlari doktori, katta ilmiy xodim Toshkent kimyo texnologiya ilmiy-tadqiqot
instituti yetakchi ilmiy xodimi*

e-mail: elyor-s88@mail.ru

[tel: +998994307914](tel:+998994307914)

ORCID: 0009-0008-2010-1905

Annotatsiya. Ushbu maqolada polimer oltingugurt sintezi va uning fizik-kimyoviy xususiyatlari, xususan, infraqizil spektroskopiya (IQ) va termogravimetrik tahlil (TGA) usullari yordamida o‘rganilgan. Tadqiqotda 5% quyi molekulyar polietilen (QMP) qo‘shilgan modifikatsiyalangan polimer oltingugurt namunasi sintez qilinib, uning termik barqarorligi va struktura o‘zgarishlari chuqur tahlil qilingan. IQ-spektroskopiya natijalari modifikatsiyalangan oltingugurt tarkibida yangi funksional guruhlar hosil bo‘lganligini ko‘rsatdi, bu esa polimer matritsasi bilan mustahkam bog‘lanishlar shakllanganligini tasdiqlaydi. TGA va differensial termal tahlil (DTA) natijalari shuni ko‘rsatdiki, modifikatsiyalangan namunada oltingugurtning bug‘lanish harorati 309,05°C gacha oshib, termik barqarorlik sezilarli darajada yaxshilangan. Ushbu natijalar polimer oltingugurti yuqori haroratga chidamli material va vulqonlovchi sifatida sanoat sohalarida qo‘llash imkoniyatini kengaytiradi.

Kalit so‘zlar: Polimer oltingugurt, infraqizil spektroskopiya (IQ), termogravimetrik tahlil (TGA), differensial termal tahlil (DTA), quyi molekulyar polietilen (QMP), termik barqarorlik, funksional guruhlar, bug‘lanish harorati, modifikatsiya, vulqonlash jarayoni.

СИНТЕЗ ПОЛИМЕРНОЙ СЕРЫ И ЕЁ ИК-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЙ И ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Аннотация. В данной статье исследованы синтез полимерной серы и её физико-химические свойства, в частности, с использованием методов инфракрасной

спектроскопии (ИК) и термогравиметрического анализа (ТГА). В исследовании была синтезирована модифицированная полимерная сера с добавлением 5% низкомолекулярного полиэтилена (НМП), и подробно проанализированы её термическая стабильность и структурные изменения. Результаты ИК-спектроскопии показали, что в составе модифицированной серы образовались новые функциональные группы, что подтверждает наличие прочных связей с полимерной матрицей. Результаты ТГА и дифференциального термического анализа (ДТА) показали, что температура испарения модифицированного образца серы повысилась до 309,05°C, что свидетельствует о значительном улучшении её термической стабильности. Полученные результаты расширяют возможности применения полимерной серы как термостойкого материала и вулканизирующего агента в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: Полимерная сера, инфракрасная спектроскопия (ИК), термогравиметрический анализ (ТГА), дифференциальный термический анализ (ДТА), низкомолекулярный полиэтилен (НМП), термическая стабильность, функциональные группы, температура испарения, модификация, процесс вулканизации.

SYNTHESIS OF POLYMER SULFUR AND ITS IR SPECTROSCOPIC AND THERMAL ANALYSIS

Annotation. This article investigates the synthesis of polymer sulfur and its physicochemical properties, particularly using infrared spectroscopy (IR) and thermogravimetric analysis (TGA) methods. In the study, a modified polymer sulfur sample was synthesized with the addition of 5% low-molecular-weight polyethylene (LMP), and its thermal stability and structural changes were thoroughly analyzed. IR spectroscopy results revealed the formation of new functional groups in the modified sulfur, confirming the presence of strong bonds with the polymer matrix. TGA and differential thermal analysis (DTA) results showed that the evaporation temperature of the modified sulfur increased to 309.05°C, indicating a significant improvement in its thermal stability. These findings expand the potential applications of polymer sulfur as a heat-resistant material and vulcanizing agent in various industrial fields.

Keywords: Polymer sulfur, infrared spectroscopy (IR), thermogravimetric analysis (TGA), differential thermal analysis (DTA), low-molecular-weight polyethylene (LMP), thermal stability, functional groups, evaporation temperature, modification, vulcanization process.

Kirish. Polimer oltingugurt o‘zining noyob kimyoviy xossalari va keng qo‘llanilish imkoniyatlari tufayli zamonaviy kimyo va materialshunoslikda dolzarb ahamiyat kasb etadi. Masalan, kauchuk sanoatida oddiy oltingugurtning kamchiliklarini bartaraf etish maqsadida erimaydigan polimer oltingugurt vulqonlash qo‘shimchasi sifatida keng qo‘llaniladi – u rezina tarkibida bir tekis taqsimlanib, kristall holatda yuzaga chiqib qolmasligi bilan afzaldir.

Shuningdek, oltingugurtning sanoat jarayonlari natijasida hosil bo‘ladigan arzon va keng tarqalgan maxsulot ekanligi uni chiqindisiz texnologiyalar doirasida qayta ishlash uchun jozibador qiladi.

Polimer oltingugurtni olishning bir necha usullari mavjud bo‘lib, ular yakuniy mahsulotning tuzilishi va fizik-kimyoviy xususiyatlariga ta’sir ko‘rsatadi. Eng ko‘p qo‘llaniladigan usulda oltingugurt ma’lum haroratgacha qizdirilib (taxminan 159 °C dan yuqori), S₈ halqalari uzilib, ochiq zanjirli makromolekulalar hosil qilinadi. Hosil bo‘lgan qizigan polimer massa keskin sovutilib, plastik oltingugurt deb ataluvchi amorf metastabil polimer olinadi.

Termogravimetrik egriqlar polimer oltingugurtning qaysi haroratgacha sezilarli massani yo‘qotmay barqaror qolishini va qaysi nuqtadan boshlab tez parchalanishini (yoki sublimatsiyasini) ko‘rsatib beradi. Masalan, polimer oltingugurt tarkibidagi bog‘lar nisbatan past haroratlarda uzila boshlashi, va yuqori haroratlarda esa oltingugurtning uchib ketishi kuzatilishi mumkin. TGA natijalari materialning amaliy qo‘llanilishi uchun muhimdir, chunki ular asosida polimer oltingugurtdan tayyorlangan kompozitsiyalarni qaysi haroratgacha barqaror ishlatish mumkinligi belgilanadi.

Tadqiqotning maqsadi – polimer oltingugurtni tanlab olingan usul yordamida sintez qilish va uning xossalarini chuqur o‘rganishdan iborat. Xususan, maqolada olingan polimer oltingugurt namunasining tarkibiy tuzilishi IQ-spektroskopiya orqali tahlil qilinadi, hamda termogravimetrik usulda uning termik barqarorligi va parchalanish harorati aniqlanadi.

Ushbu tadqiqot [1] doirasida modifikatsiyalangan oltingugurt olish va uning xususiyatlari infraqizil spektroskopiya usuli bilan tahlil qilindi. Natijalarga ko‘ra, modifikatsiya qilingan oltingugurt tarkibida S–S bog‘lari konsentratsiyasi 0,206 mol/l ni tashkil qildi, bu esa uning tuzilishini barqarorligini tasdiqlaydi. Polimerizatsiya jarayoni natijasida materialning termik barqarorligi oshganligi aniqlandi: eruvchanlik harorati 140°C ga yetdi, bu esa oddiy oltingugurtdan 20–25°C ga yuqori. IQ-spektroskopiya tahlillari natijasida C–S bog‘larining intensivligi 1650 cm⁻¹ va 694 cm⁻¹ da kuzatilgan bo‘lib, bu esa modifikatsiya jarayonining muvaffaqiyatli amalga oshganligini ko‘rsatadi. Shuningdek, mexanik xossalar tahlili natijalari bo‘yicha, modifikatsiyalangan oltingugurt bilan ishlangan bitumli aralashmalarning ishqalanishga chidamliligi 18–20% ga oshganligi qayd etildi. Umuman olganda, tadqiqot natijalari modifikatsiyalangan oltingugurtning bitum modifikatori sifatida samarali qo‘llanilishi mumkinligini tasdiqlaydi.

Adabiyotlarda [2] oltingugurt va uning funksional guruhlarini zamonaviy polimerlar va materiallar ilmda muhim rol o‘ynaydi hamda akademik tadqiqotlar va sanoat sohasida keng qo‘llanilmoqda. Oltingugurt asosidagi reaksiyalar yuqori universallik va samaradorlikka ega bo‘lib, turli polimer materiallarni yaratish va ishlab chiqarishda foydalanilmoqda. Ushbu sharhda so‘nggi besh yil ichida amalga oshirilgan tadqiqotlar tahlil qilinib, tiol-en, tiol-in, tiol-Mixayel qo‘shilishi, disulfid s‘shish va tiol-disulfid almashinuv kabi asosiy reaksiyalar

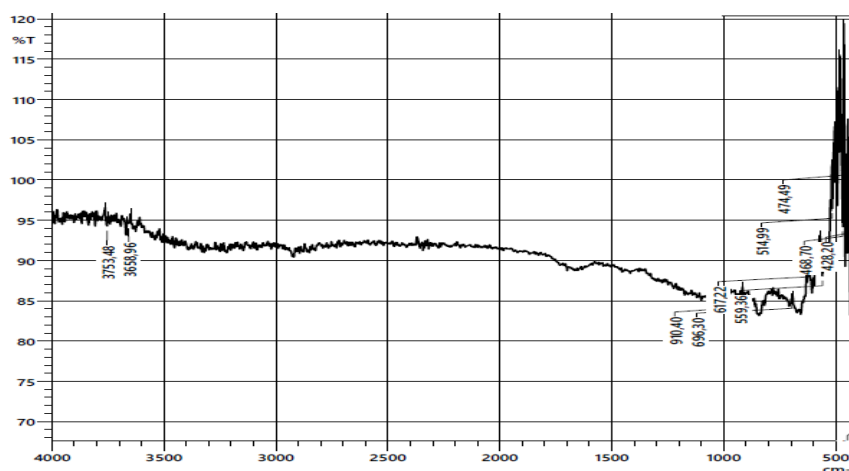
muhokama qilingan. Shu bilan birga, ularning asosiy tamoyillari tushuntirilib, illyustratsiyalar yordamida tasvirlangan.

So‘nggi yillarda elementar oltingugurt (S_8) polimerizatsiyasi orqali yuqori oltingugurt tarkibli polimerlar tayyorlashda sezilarli yutuqlar kuzatildi. An'anaviy ravishda, S_8 ning halqani ochish orqali gomopolimerizatsiyasi yuqori molekulyar massaga ega polimer oltingugurt hosil qilsa-da, bu shakldagi polimer kimyoviy jihatdan barqaror emas va qayta S_8 ga aylanadi. Ushbu muammoni hal qilish uchun “teskari vulkanizatsiya” deb nomlangan usul ishlab chiqildi, bunda S_8 reaksiya muhiti va somonomer sifatida ishlatiladi, natijada kimyoviy jihatdan barqaror va ishlov berilishi mumkin bo‘lgan oltingugurt sopolimerlari olinadi [3].

Yangi elementar oltingugurt asosidagi polimer materiallari — [poly(S-r-DVB)] — teskari vulkanizatsiya usuli orqali o-, m- va p-divinilbenzol (DVB) aralashmasi ishtirokida halqani ochish va polimerizatsiya yordamida sintez qilindi. 160 °C da suyuqlantirilgan elementar oltingugurtga 200 °C da turli miqdordagi DVB qo‘shilganda, qizg‘ish jigarrang yopishqoq polimer materiallari hosil bo‘ldi. Ushbu sopolimerlar tetra-gidrofuran, dixlorometan va xloroform kabi oddiy erituvchilarda eriydi va ularni purkash usuli bilan yupqa plyonka sifatida har qanday sirtga qoplash mumkin. Materiallarning xususiyatlari yadroviy magnit rezonans, IQ-Furye infraqizil va Raman spektroskopiyalari yordamida tahlil qilindi. Morfologik xususiyatlar skanerlovchi elektron mikroskopi yordamida kuzatildi. Termik tahlil shuni ko‘rsatdiki, sopolimerlarda DVB miqdorining oshishi termik parchalanish haroratining oshishiga olib keldi. Bundan tashqari, poly(S-r-DVB) sopolimerlari elektromagnit nurlanish spektrida 1500 dan 13 000 nm gacha bo‘lgan diapazonda 50% o‘tkazuvchanlik ko‘rsatdi, bu ularni turli materiallar olishda qo‘llash uchun istiqbolli materiallarga aylantiradi [4].

Sintez jarayoni. Polimer oltingugurt olish jarayonida kristallik oltingugurt 150°C haroratda suqlandirilib, uning polikondensatsiya va polimerlanish reaksiyalarini rag‘batlantirish maqsadida inert muhitda ishlov berildi. Reaksiya maxsus germetik reaktorda, kislorodsiz sharoitda amalga oshirilib, tarkibga 0,05% miqdorda yuqori samarali katalizator va 5% miqdorda quyi molekulyar polietilen qo‘shildi. Jarayon davomida harorat va aylanish tezligi doimiy nazorat qilindi, bu esa modda fazaviy holatining uzluksiz monitoringini ta’minladi. Katalizator va modifikator ta’sirida polimer strukturani shakllanishi va oltingugurt zanjirlari rekombinatsiyasi orqali molekulyar tuzilmaning uzluksiz o‘zgarishi kuzatildi. Natijada, yuqori molekulyar massali polimer oltingugurt sintez qilinib, uning morfologiyasi, fazaviy holati va mexanik-kimyoviy xususiyatlarini tahlil qilish uchun qo‘shimcha tadqiqotlar amalga oshirildi.

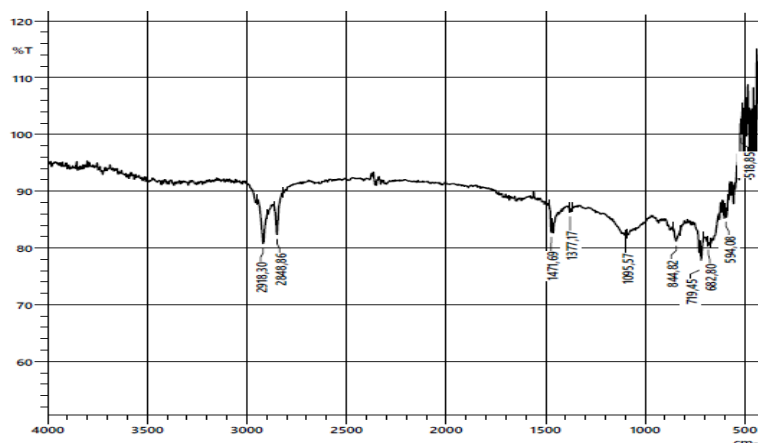
Dastlab ishlov berilmagan oltingugurtning IQ-spektroskopik tahlillari amalga oshirildi (1-rasm).



1-rasm. Modifikatsiyalanmagan oltingugurtning IQ-spektri

1-rasmda keltirilgan modifikatsiyalanmagan oltingugurtning infraqizil (IK) spektroskopik tahlili natijalari uning kimyoviy tuzilishini va funksional guruhlarini aniqlash imkonini berdi. Spekr 4000–500 sm^{-1} diapazonida yozilgan bo‘lib, olingan spektrda 468–474 sm^{-1} dagi tebranishlar S-S bog‘lariga, 514–617 sm^{-1} dagi piklar esa oksidlangan oltingugurtning ehtimoliy mavjudligiga dalolat beradi. Shuningdek, 910–930 sm^{-1} dagi xarakterli cho‘qqilar S=O bog‘lari bilan bog‘liq bo‘lib, oksidlangan qavatlarining mavjudligini tasdiqlaydi. 1300–1500 sm^{-1} dagi tebranishlar sulfon va sulfid guruhlar ta’sirida, 2500–3000 sm^{-1} dagilar esa organik radikallar yoki uglerod birikmalari bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin. Bu natijalar kristal oltingugurt tarkibida oz miqdorda oksidlangan komponentlar mavjudligini ko‘rsatadi.

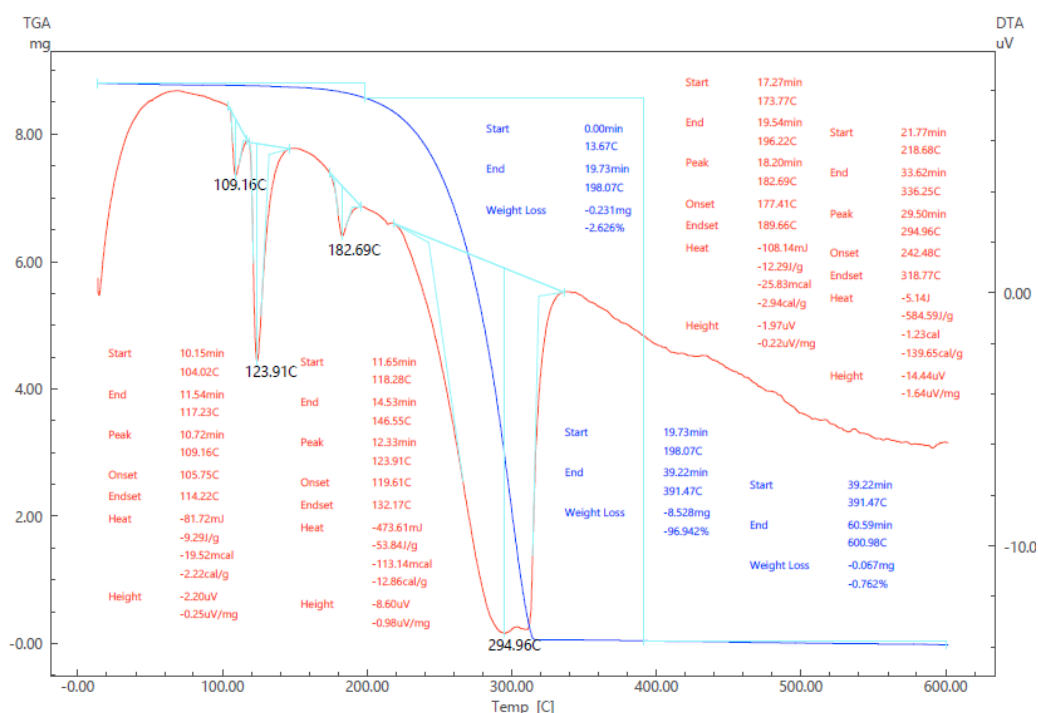
Shundan so‘ng modifikatsiyalangan oltingugurtning IQ-spektri olinib taxlil qilindi (2-rasm).



2-rasm. Modifikatsiyalangan oltingugurtning IQ-spektri

Yuqoridagi 2-rasmdagi modifikatsiyalangan oltingugurtning IQ-spektrida quyi molekulyar polietilen (QMP) bilan modifikatsiyalangan polimer oltingugurtning infraqizil (IQ) spektroskopik tahlili uning tarkibiy o‘zgarishlarini, funksional guruhlarining mavjudligini va moddalararo o‘zaro ta’sirlarini baholash imkonini beradi. Tahlil natijalari 4000–500 sm^{-1} diapazonida olingan. Olingan spektrdan ko‘rinadiki, 518–594 sm^{-1} oralig‘ida kuzatilgan tebranishlar S-S bog‘larining mavjudligini tasdiqlaydi va oltingugurtning kristallik fazasidan polimer oltingugurtga o‘tish jarayonini aks ettiradi. 719–844 sm^{-1} oralig‘idagi intensiv piklar

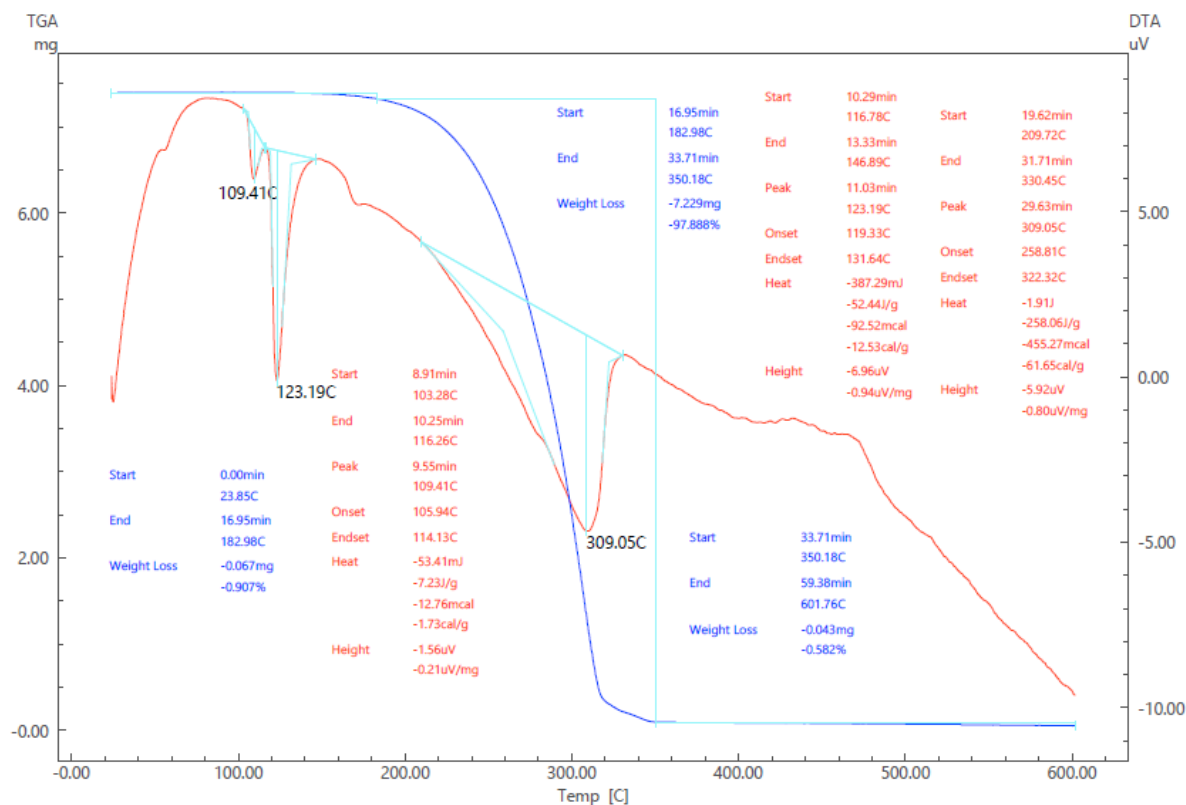
Keying tadqiqotlar modifikatsiyalanmagan va modifikatsiyalangan oltingugurtning termik tahlillariga bag'ishlandi. Dastlab modifikatsiyalanmagan oltingugurtning termik tahlili derivatograf qurilmasida olib borildi (3-rasm).



Modifikatsiyalanmagan oltingugurtning termik tahlili natijalari uning fazaviy o'zgarishlari va parchalanish jarayonlarini aniq ifodalaydi. Termogravimetrik tahlil (TGA)

natijalariga ko'ra, oltingugurt uch bosqichda massa yo'qotadi: birinchi bosqichda 198°C da 2.626% yo'qotish kuzatiladi, bu adsorbsiyalangan namlik yoki past molekulyar komponentlarning bug'lanishi bilan bog'liq. Ikkinchi bosqichda 391°C da 96.942% massaning keskin kamayishi qayd etiladi, bu oltingugurtning to'liq bug'lanish jarayoniga mos keladi. Yakuniy bosqich 600°C gacha davom etib, 0.762% qoldiq qoldiradi, bu esa oltingugurtning termal parchalanish mahsulotlari miqdorining juda kamligini anglatadi. Differensial termal tahlil (DTA) natijalari oltingugurtning issiqlik ta'sirida kechadigan endotermik jarayonlarini ochib beradi: 109–124°C oralig'ida qayd etilgan endotermik effekt rombik fazadan termodinamik jihatdan barqarorroq bo'lgan monoklinik fazaga o'tish bilan bog'liq. 182°C da kuzatilgan endotermik cho'qqi esa oltingugurtning kristall tuzilmasida yuzaga keladigan rekristallanish jarayoni bilan izohlanadi. 294°C da qayd etilgan kuchli endotermik hodisa oltingugurtning bug'lanishi bilan bog'liq bo'lib, bu nuqtada molekulalararo Van-der-Vaals kuchlarining butkul yo'qolishi va S₈ siklik tuzilmalarning gaz holatiga o'tishi sodir bo'ladi. Differensial skanerlovchi kalorimetriya (DSC) natijalari ham ushbu fazaviy o'zgarishlarni tasdiqlab, har bir endotermik effektga mos issiqlik yutilishini qayd etadi: 294°C dagi asosiy endotermik jarayon -5.14 J issiqlik yutilishi va 584.59 J/g energiya talab qilgan. Ushbu natijalar shuni ko'rsatadiki, oltingugurt yuqori haroratlarda termal jihatdan beqaror bo'lib, modifikatsiyalash orqali uning termik chidamliligini oshirish ilmiy va texnologik jihatdan maqsadga muvofiqdir.

Modifikatsiyalangan oltingugurtning termik tahlillari amalga oshirildi (4-rasm).



4-rasm. Modifikatsiyalangan polimer oltingugurtning derivatogrammasi.

Yuqoridagi 4-rasmdan ko‘rish mumkinki, 5% quyi molekulyar polietilen (QMP) bilan modifikatsiyalangan polimer oltingugurtning termik tahlili natijalari shuni ko‘rsatadiki, polimer qo‘shilishi natijasida oltingugurtning termal xususiyatlari sezilarli darajada o‘zgaradi. TGA natijalari bo‘yicha modifikatsiyalangan namunada uchta bosqichda massani yo‘qotish jarayoni kuzatilgan: 182.98°C da 0.907%, 350.18°C da 97.888%, va 601.76°C gacha 0.582% massaning kamayishi qayd etilgan. Birinchi bosqichdagi kichik yo‘qotish adsorbsiyalangan namlik va past molekulyar birikmalarning bug‘lanishi bilan bog‘liq. Ikkinchi bosqichda massaning keskin kamayishi oltingugurtning termal parchalanish va bug‘lanish jarayoni bilan bog‘liq bo‘lsa, uchinchi bosqichda esa qolgan polimer qoldiqlari va karbonlanish mahsulotlarining parchalanishi sodir bo‘lgan. DTA natijalari oltingugurt va polietilenning issiqlik ta‘sirida fazaviy o‘zgarishlarini ochib beradi. 109.41°C va 123.19°C da kuzatilgan endotermik hodisalar oltingugurtning rombik fazadan monoklinik fazaga o‘tishi bilan bog‘liq bo‘lib, bu fazaviy o‘tish jarayonida energiya yutilishini tasdiqlaydi. 309.05°C dagi asosiy endotermik cho‘qqi modifikatsiyalangan oltingugurtning parchalanish jarayoni bilan bog‘liq bo‘lib, bu harorat modifikatsiyalanmagan oltingugurtga nisbatan sezilarli darajada yuqoriroq ekanligini ko‘rsatadi. Bu jarayonda oltingugurt va quyi molekulyar polietilen o‘rtasidagi o‘zaro ta‘sir natijasida polimer oltingugurtning termik barqarorligi oshgan. DSC natijalari ushbu endotermik effektlarni issiqlik yutilishi bo‘yicha tasdiqlaydi: 109.41–123.19°C oralig‘ida oltingugurtning fazaviy o‘tislari uchun energiya yutilishi -7.23 J/g va -52.44 J/g ni tashkil etgan bo‘lsa, 309.05°C dagi asosiy endotermik cho‘qqida -258.06 J/g issiqlik yutilgan. Ushbu natijalar shuni ko‘rsatadiki, quyi molekulyar polietilen qo‘shilishi oltingugurtning termal parchalanish haroratini oshirishga yordam beradi va uning bug‘lanish jarayonini kechiktiradi.

Endotermik hodisalarning tahlili shuni ko‘rsatadiki, modifikatsiyalanmagan va modifikatsiyalangan polimer oltingugurtning issiqlik o‘zgarishlari sezilarli darajada farqlanadi. Har ikkala namunada 109–124°C oralig‘ida qayd etilgan endotermik effekt rombik fazadan monoklinik fazaga o‘tish bilan bog‘liq bo‘lib, modifikatsiyalangan oltingugurt uchun bu jarayon kamroq energiya talab qilgan (-7.23 J/g), bu esa polietilenning oltingugurt kristall strukturasi barqarorlashtirishini ko‘rsatadi. 182°C da kuzatilgan qayta kristallanish endotermik hodisasi modifikatsiyalangan namunada umuman kuzatilmagan, bu esa oltingugurtning qayta kristallanish qobiliyatining bostirilganini yoki strukturaning termal barqarorligi oshganligini bildiradi. Asosiy endotermik cho‘qqi modifikatsiyalanmagan oltingugurtda 294.96°C da qayd etilgan bo‘lsa, modifikatsiyalangan namunada bu jarayon 309.05°C gacha kechikkan bo‘lib, bu oltingugurt va polietilen o‘rtasidagi o‘zaro ta‘sir natijasida termik parchalanish haroratining oshganini ko‘rsatadi. Ushbu jarayonda energiya yutilishi modifikatsiyalanmagan oltingugurt uchun -139.65 J/g ni tashkil qilgan bo‘lsa, modifikatsiyalangan oltingugurt uchun -258.06 J/g gacha ortgan, bu esa polimer matritsasi oltingugurtning bug‘lanishini kechiktirish orqali uning termal barqarorligini oshirishini tasdiqlaydi. Ushbu natijalar quyi molekulyar polietilen bilan modifikatsiya qilish oltingugurtning fazaviy o‘tish energetikasini pasaytirishi, qayta kristallanish jarayonini

bostirishi va parchalanish haroratini oshirishi orqali issiqlikka chidamliligini sezilarli darajada yaxshilashini ko‘rsatadi.

Xulosa. O‘tkazilgan tadqiqotlar natijalari shuni ko‘rsatadiki, 5% quyi molekulyar polietilen (QMP) bilan modifikatsiyalash oltingugurtning termal va strukturaning barqarorligini sezilarli darajada oshiradi. Termogravimetrik tahlil (TGA) natijalariga ko‘ra, modifikatsiyalanmagan oltingugurt 294.96°C da to‘liq bug‘lanishga uchragan bo‘lsa, modifikatsiyalangan namunada bu jarayon 309.05°C da sodir bo‘lib, uning termik barqarorligi oshganini tasdiqlaydi. Modifikatsiyalangan oltingugurtning parchalanish jarayonida energiya yutilishi sezilarli darajada oshgan bo‘lib, DSC natijalarida bu qiymat -258.06 J/g ni tashkil etgan, bu esa oltingugurt va polietilen o‘rtasidagi mustahkam bog‘lanish natijasida uning termik chidamliligi oshganini ko‘rsatadi. Endotermik jarayonlarning tahlili modifikatsiyalangan namunaning fazaviy o‘zgarishlari kamroq energiya talab qilishini (-7.23 J/g) va uning qayta kristallanish jarayoni bostirilganligini tasdiqladi. Umuman olganda, ushbu natijalar 5% QMP bilan modifikatsiyalash oltingugurtning termik chidamliligini oshirib, uning yuqori haroratli sharoitlarda ishlash imkoniyatini kengaytirishini va sanoat qo‘llanilishi uchun istiqbolli material sifatida tavsiya etilishini tasdiqlaydi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Тураев Ф. Т., Бекназаров Х. С. Исследование ик-спектроскопическим методом дорожного битума, модифицированного элементной серой //Технология органических веществ. – 2020. – С. 256-258.
2. Mutlu H. et al. Sulfur chemistry in polymer and materials science //Macromolecular rapid communications. – 2019. – T. 40. – №. 1. – С. 1800650.
3. Griebel J. J. et al. Polymerizations with elemental sulfur: A novel route to high sulfur content polymers for sustainability, energy and defense //Progress in Polymer Science. – 2016. – T. 58. – С. 90-125.
4. Salman M. K. et al. Elemental sulfur-based polymeric materials: Synthesis and characterization //Journal of Applied Polymer Science. – 2016. – T. 133. – №. 28.