

**switchasia**  
GRANTS PROGRAMME



Европын Холбоо  
санхүүжүүлэв



SUSTAINABLE  
PLASTIC  
RECYCLING  
IN MONGOLIA



МОНГОЛ УЛСЫН ШИНЖЛЭХ УХААНЫ АКАДЕМИ  
ФИЗИК, ТЕХНОЛОГИЙН ХҮРЭЭЛЭН

---

## ХУВАНЦАР ХОГ ХАЯГДЛЫГ ДАХИН БОЛОВСРУУЛСАН БҮТЭЭГДЭХҮҮНИЙ ДҮН ШИНЖИЛГЭЭ, ТУРШИЛТ

---

СУДАЛГААНЫ АЖЛЫН ХУРААНГУЙ ТАЙЛАН  
ЦУВРАЛ 2.

Улаанбаатар 2023 он

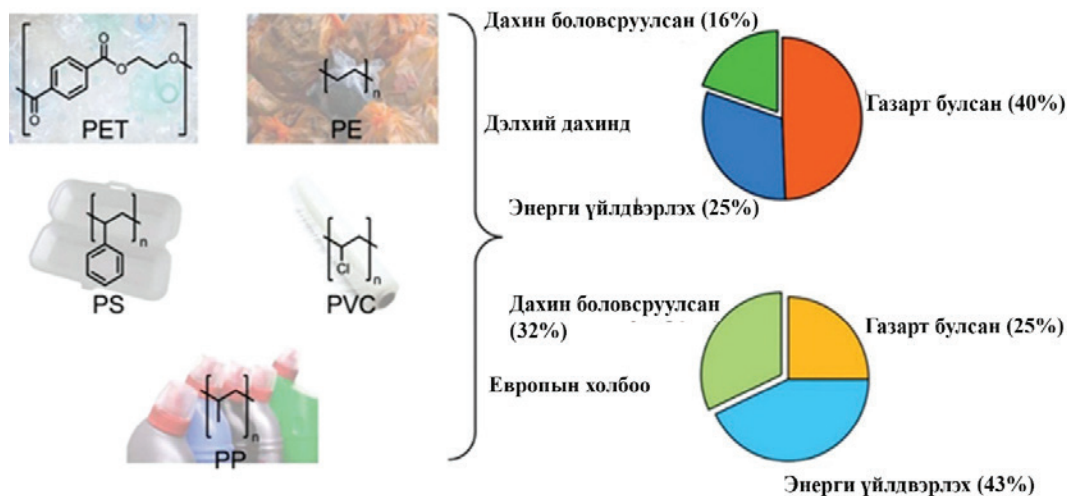
Энэхүү судалгааны тайланг Европын Холбооны санхүүжилттэй “Монгол улс дахь хуванцар хог хаягдлын дахин боловсруулалтын тогтвортой байдлыг хангах төсөл”-ийн хүрээнд Монголын байгаль орчин аюулгүй байдлын төв ТББ-ын захиалгаар Физик Технологийн Хүрээлэнгийн судлаач, доктор Л.Сарантуяа боловсруулав. Энэхүү тайланд орсон агуулга нь Европын Холбооны байр суурийг илэрхийлээгүй болно.

Гүйцэтгэгч: Л.Сарантуяа, Доктор

Захиалагч: МОНГОЛЫН БАЙГАЛЬ ОРЧИН  
АЮУЛГҮЙ БАЙДЛЫН ТӨВ ТББ

## ХАЯГДАЛ ХУВАНЦРЫГ ДАХИН БОЛОВСРУУЛАН, БҮТЭЭГДЭХҮҮН ГАРГАН АВАХ ТЕХНОЛОГИЙН БОЛОМЖУУД

Дэлхийн зах зээл дахь хуванцар материалуудын эрэлт хэрэгцээ тогтмол нэмэгдэж байгаатай холбоотойгоор 2030 он гэхэд нийт хаягдал хуванцар материалуудыг дахин боловсруулах хэмжээг жилд 236 сая тонноос 417 тонн хүртэл нэмэгдүүлэх төлөвлөгөө гаргасан байна. Хуванцар материалуудыг дахин боловсруулах нь хүрээлэн буй орчинд үзүүлэх бохирдлын хэмжээг бууруулах хамгийн гол арга замын нэг юм. Судалгааны тоймуудаас харахад дэлхий даяар нийт полимер материалуудын 16% нь дахин боловсруулагдсан бол 40%-ийг газар булсан харин 25%-ийг шатааж устгасан байгааг Зураг 1-д үзүүллээ. Ялангуяа сүүлийн жилүүдэд европын орнууд хаягдал хуванцрыг дахин боловсруулах ажлыг эрчимтэй хийсээр байна. Одоогийн байдлаар нийт хаягдал хуванцруудын 1/3 хувийг дахин боловсруулж байгаа нь өмнөх жилүүдтэй харьцуулахад 2 дахин ихэссэн үзүүлэлт ба эдгээр хаягдлын 39.9% -ийг сав баглаа боодлоос гарсан хаягдал эзэлж байна.



Зураг 1. Нэг удаагийн сав баглаа боодолд хэрэглэгддэг гол полимер нэгдлүүдийн хаягдал: poly(ethylene terephthalate) (PET), polystyrene (PS), polyethylene (PE), polypropylene (PP), and poly(vinyl chloride) (PVC) [1-2].

Нэг удаагийн сав баглаа боодлыг дахин боловсруулах нь эдийн засгийн хувьд харьцангуй ашигтай байдаг ба хамгийн сүүлийн үеийн судалгаагаар европт цугларсан нийт хаягдал хуванцруудын 42%-ийг дахин боловсруулсан бол харин 40%-ийг энерги үйлдвэрлэхэд зарцуулсан ба 19%-ийг хогийн цэгт хаясан байна. Хуванцар материалууд нь харьцангуй задрал багатай, тогтвортой нэгдлүүдээс бүрддэг учир тэдгээрийг энерги үйлдвэрлэхэд болон дахин боловсруулж бүтээгдэхүүн гарган авахад өргөн хэрэглэгдэх давуу талтай. Харин эсрэгээрээ энэхүү задардаггүй, тогтвортой шинж чанараас болж

хогийн цэгүүдэд хуванцар материалууд хэт ихээр цугларч зарим хэсэг нь хүрээлэн буй орчинд шууд хаягдаж байна. Хуванцар материалуудын хэрэгцээ нэмэгдэж боловсруулах аргууд ч ихсэхийн хэрээр жижиг хэмжээтэй микро болон нано хуванцрууд хэрэглээний ус болон хүрээлэн буй орчин, хотжилтын бүсүүд, бидний хоол хүнсийг бохирдуулах нь нэмэгдсээр байна [3].

Сүүлийн үеийн судалгаанаас харахад далайн усанд агуулагдаж буй микро хуванцрын хэмжээ 15 жилийн өмнөхөөс 60 дахин нэмэгдсэн байна. Микро хуванцрууд нь хорт хавдар, үргүйдэл болон сэтгэл зүйн өвчин, төрөхийн хүндрэлийг нэмэгдүүлэх хүчин зүйл болдог учир хүний эрүүл мэндэд маш том сөрөг нөлөө үзүүлдэг. Лабораторийн туршилтаар хүмүүсийн тогтмол идэж байгаа хоол хүнсэнд агуулагдаж байгаа микро хуванцрууд хүний эсийг гэмтээж чадахаар их хэмжээтэй байгааг олж тогтоосон. Эсийг үхэлд хүргэх болон харшил үүсгэх хариу урвалууд тухайн хүн хэр их хэмжээгээр микро хуванцрыг идэж байгаагаас шууд хамаардаг. Хэрэв тухайн хүн амьсгалын замаар микро хуванцрыг биедээ нэвтрүүлсэн тохиолдолд уушигны өвчлөл үүсгэх боломжтой ба энэ нь тухайн микро хуванцрын хэмжээ, гадаргуун цэнэг болон, функциональ бүлэг, гадаргуу дахь уураг, гидрофоб шинж чанар зэргүүдээс нь хамаардаг [4].

Европын холбооны (EU) хог хаягдлын удирдлагын газраас хуванцар хаягдлыг хогийн цэгт булшлах процесст татвар оногдуулах болсон нь дахин боловсруулах хуванцрын хэмжээг нэмэгдүүлсэн боловч үүний хажуугаар хаягдлаас энерги гаргаж авах аргыг сонгох нь нэмэгдсэн [5]. Хаягдал хуванцруудыг газар булшлахад ноогдуулсан татвар улс болгонд харилцан адилгүй байдаг ба жишээ нь: Европын холбооны 24 улсад л татвар авдаг, харин 18-д нь газар булшлахыг хориглосон байна [6-7]. Үүнээс гадна Европын холбооны зөвлөлийн 2020 оны дүгнэлтэд дурдсанаар дахин боловсруулагдах боломжгүй хуванцарт татвар ноогдуулахаар болсон байна [8]. Харин Нэгдсэн Вант Улс 1 тонн хуванцар хог хаягдлыг газарт булаах өртөг 1995 оноос 1345%-иар нэмэгдүүлж 94.15 фаунд болгож өсгөсөн байна. 2018 оны The Waste and Resources Action Programme (WRAP)-ийн тайланд дурдсанаар Нэгдсэн Вант Улс нийт хуванцар хаягдлын 47%-ийг дахин боловсруулсан бол 43%-ийг хэрэгцээтэй түүхий эд болгосон байна [9,10].

Жишээ болгож 2015-2016 оны хооронд дахь Нэгдсэн Вант Улсын цуглуулсан хуванцар хог хаягдлын 40% нь poly(ethylene terephthalate), (PET), 22% нь polyethylene, (PE), үлдсэн 10.2% нь polypropylene, (PP), poly(vinyl chloride), (PVC), болон polystyrene, (PS) тус тус бүрдүүлж байна [11]. Эдгээр 5 ширхэг термо хуванцрууд нь сав баглаа боодолд хамгийн өргөн хүрээнд ашиглагддаг. Эндээс өндөр нягттай полиэтилен (HDPE) болон полиэтилентерепфталат (PET)-ийг ихэвчлэн усны сав, хоол хүнс болон цэвэрлэгээний бодисыг хадгалахад ашигладаг. Харин хүнсний уутыг ихэвчлэн бага нягттай полиэтилен LDPE болон LLDPE болон поливинилхлорид (PVC)-ээр хийдэг. Полистрол (PS) болон EPS-ийг хүнсний болон өргөн хэрэглээний барааны сав баглаа боодолд ихэвчлэн хэрэглэдэг [12,13].

**Хүснэгт 1. Сав баглаа боодолд хэрэглэгддэг 5 полимер нэгдэл ба тэдгээрийн хэрэглээ болон тэдгээрийн эзлэх хувь [10].**

Хуванцар	Эзлэх хувь (%)	Хэрэглээ
PET	40	Усны сав, хоол хүнс хадгалах сав баглаа боодол, цэвэрлэгээний бодис хадгалах сав
HDPE and LDPE	22	Хүнсний уут, сав баглаа боодод
PP	10.2	Сав баглаа боодлын бөглөө
PVC	<2	Усны хоолой
PS	<2	Хүнсний өргөн хэрэглээний барааны сав баглаа боодол, түргэн хоолны сав баглаа боодол

Дэлхийн нийтээр хуванцрын талаас илүү хувь нь дахин боловсруулахгүйгээр шууд хаягддаг [12]. Ийм учраас эдгээрээс үүдэлтэй хог хаягдлаас хүрээлэн буй орчныг хамгаалахын тулд хуванцар хаягдлыг шууд хаях биш дахин боловсруулах аргад шилжих шаардлага үүсч байна. Сүүлийн 2 жилийн хугацаанд **COVID-19** өвчний улмаас хүмүүс нэг удаагийн бүтээгдэхүүнийг сонгох нь улам ихэссэн. Өвчин үүсгэгч вирусээр бохирдсон сав, боодол хэрэглэхээс зайлс хийх болсон зэрэг асуудлаас болж хуванцар материалын хэрэглээ нэмэгдсэн боловч дахин боловсруулж ашиглах үед вирусийн халдвар авах боломжтой гэсэн айдсаас болж полимер нэгдлүүдийг дахин боловсруулах хэмжээ эрс буурах хандлагатай байна. Полимер нэгдлүүдийг дахин боловсруулах 4 үе шат байдаг ба тэдгээрийг Хүснэгт 2-т харууллаа. Анхдагч дахин боловсруулалтын үед цэвэр аль эсвэл хэрэглэхийн өмнөх полимеруудыг жижиглэж бутлаад тэдгээрийг өндөр температурт хайлуулж хэвэнд оруулдаг. Харин хоёрдогч боловсруулалтын үеэр хэрэглэсэн полимеруудыг эхлээд ангилж дараа нь тэдгээрийг буталж хайлуулаад түүнийгээ хэвэнд оруулдаг. Зөв боловсруулах нөхцөлийг сонгож өгсөн үед тухайн материалын шинж чанарыг өөрчлөхгүйгээр хэдэн ч удаа хоёрдогч боловсруулалтад орж болно.

Харин гуравдагч боловсруулалтын үед хоёрдогч боловсруулалтад орох боломжгүй хуванцруудыг химийн аргаар мономерт нь задалж дахин тухайн материалыг гаргаж авдах аль эсвэл өөр органик материалуудыг ч гаргаж авдаг. Дөрөвдөгч боловсруулалтаар дээрх аргуудаар дахин боловсруулагдах боломжгүй болсон тохиолдолд тухайн хуванцарыг пиролизд оруулж энерги гаргаж авах ба энэ үед хүрээлэн буй орчинд сөрөг нөлөөтэй хүлэмжийн хий ялгардаг [13,14].

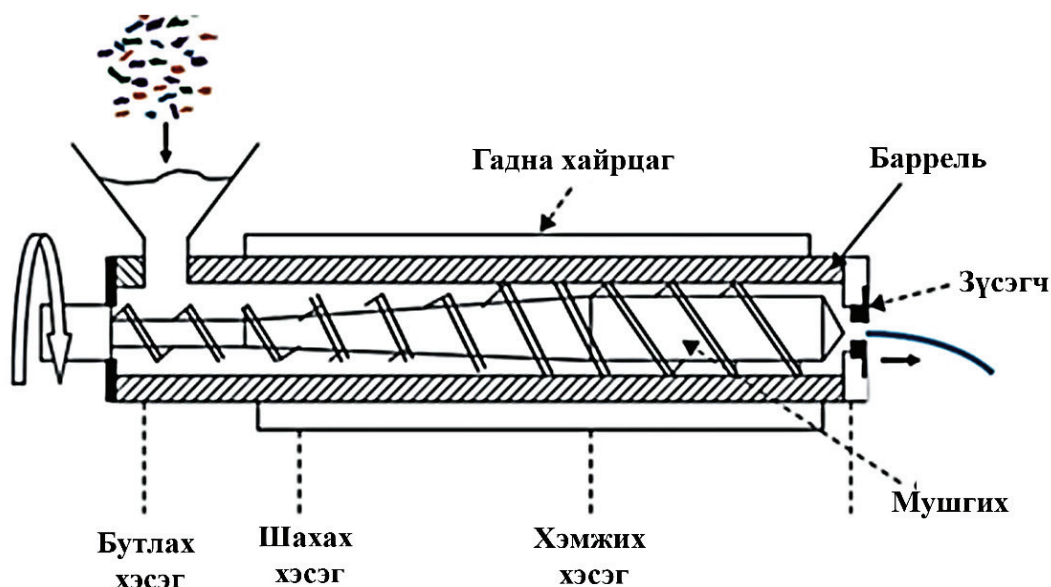
Эдгээрээс хамгийн өргөн хэрэглэгддэг ба өртөг багатай арга нь механик дахин боловсруулах арга юм.

## Хүснэгт 2. Хуванцар дахин боловсруулах аргууд.

№	Дахин боловсруулах үе шат	Жишээ
Анхдагч	Механик дахин боловсруулалт	Сав баглаа, боодол гарган авах
Хоёрдагч	Механик дахин боловсруулалт	Үнэ багатай полимер гаргаж авах
Гуравдагч	Химийн дахин боловсруулалт	Полиэфирийн деполимержилт
Дөрөвдөгч	Энерги дахин сэргээх	Пиролиз

### Механик дахин боловсруулалтын арга

Шахах арга нь энгийн хаягдал хуванцраас шинэ хуванцар гаргаж авах хамгийн өргөн хэрэглэгддэг арга юм. Энэхүү арга нь хямд, уусгагч ашигладаггүй ба маш олон полимер материалд хэрэглэж болдог буюу PET, EPS, HDPE, LDPE, PE, PP, PS, PVC зэрэг термо хуванцруудыг дахин боловсруулахад ашиглах бүрэн боломжтой [15]. Шахах аргад дулааны болон шургын төхөөрөмжүүдийг ашигладаг [16,17].



Зураг 2. Дан шурга ашигласан шахагч машины схем.

Энэхүү боловсруулалтын үеэр хэрэглэсэн полимеруудыг эхлээд ангилж дараа нь тэдгээрийг буталж хайлуулаад түүнийгээ хэвэнд оруулж шахдаг ба сул тал нь өгч буй дулаан болон механик шахалтаас болж тухайн материалд дулааны исэлдэлт болон тухайн полимерт бүтцийн өөрчлөлт явагддаг. Тухайн полимерийн бүтцийн өөрчлөлтөөс болж

материалын механик шинж чанар буурдаг [18]. Шахах процессоос гарах материалын химийн шинж чанар нь тухайн процессын нөхцөлөөс шууд хамаардаг. Үндсэн задралын механизм нь тухайн полимерийн гол хэлхээний дагуу хүчилтөрөгчөөр өдөөгдсөн перокси радикал үүсгэдэг ба мөн түүнчлэн үстөрөгчийг халж радикал үүсгэдэг. Шахалтын улмаас үүссэн радикалууд  $\beta$  хувирал үүсгэдэг ба энэ нь гинжин хэлхээг нь багасгаж зуурамтгай шинж чанартай болгодог.

Шахах процессын үед үүсч буй задралыг температур болон эргэх хурд зэргээр нь шууд удирдаж болдог. Хэт өндөр температур болон эргэх хурдаас шалтгаалан гинжин хэлхээ хуваагдах процесс илүү эрчимтэй явагддаг ба мөн дахин боловсруулагдах боломжгүй бүтээгдэхүүн үүсэх боломжтой.

Мөн түүнчлэн тухайн хаягдал полимер материалуудыг зөв ангилахгүй бол дээр дурдсан задралыг ихэсгэдэг. Жишээ нь PET дахь PVC-ийн агуулга нь дулааны боловсруулалт явуулж байх үед гидрохлоржилт явагдахад хүргэдэг. Үүнээс гарсан бүтээгдэхүүнд HCl үүсч PET-ын задралыг ихэсгэж бүтээгдэхүүнд гэмтэл үзүүлдэг [19]. Тиймээс ч хуванцар материалыг дахин боловсруулахын өмнө сайтар ангилсан байх нь дахин боловсруулалтад маш чухал юм [20]. Бид хаягдал хуванцрыг дахин боловсруулан бүтээгдэхүүн гарган авах судалгаандаа энэхүү аргыг ашиглахаар сонгосон.

### **Химийн аргаар дахин боловсруулалт хийх**

Полимерийг химийн аргаар дахин боловсруулахдаа тухайн полимер нэгдлийг мономерт хувиргаж түнээс тухайн полимерийг аль эсвэл нефтийн бүтээгдэхүүн болон бусад химийн бүтээгдэхүүнүүдийг гаргаж авдаг. Энэхүү аргад пиролиз, гидрогенжүүлэх, хийн болон дулааны боловсруулалтын аргууд ордог. Химийн дахин боловсруулалтад ашиглагдах хуванцарын цэвэршилт нь механик боловсруулалтад ашигладагтай адил өндөр цэвэршилттэй байхыг шаарддаггүй. Гэсэн хэдий ч тухайн процессд их хэмжээний материалыг нэгэн зэрэг ашигласан тохиолдолд л эдийн засгийн хувьд үр өгөөжтэй байж чаддаг. Өөрөөр хэлбэл бага хэмжээтэй хуванцар материалыг энэхүү аргаар дахин боловсруулбал эдийн засгийн хувьд алдагдалтай.

### **Уусгах/дахин тунадасжуулах арга**

Энэхүү аргаар PET, EPS, HDPE, LDPE, PE, PP, PS, PVC зэрэг термо хуванцаруудыг дахин боловсруулах боломжтой. Түршилтын ерөнхий горим нь 1гр полимер материал дээр 20мл уусгагчийг хийж соронзон хутгуураар хутгана. Тухайн дээжийг 30 минутын турш тохиромжтой температурт халаана. Үүний дараагаар дээжийг тасалгааны температур хүртэл хөргөөд түүнийгээ уусдаггүй уусмалд хийж тунадасжуулана. Дахин боловсруулсан полимерийг филтерээр шүүж дараагаар нь хатааж нунтаг хэлбэртэй гаргаж авна.

Уусгагчаар тулуол, дихлорметан, бензилын спиртыг ашигладаг бол харин уусдаггүй уусмалаар гексан болон метанолыг ашигладаг. Мөн түүнчлэн энэхүү урвалд бусад параметрууд буюу уусгагч болон тунадасжуулагчийн харьцаа, полимерийн концентраци, температур зэрэг нь бүтээгдэхүүн бодист шүүд нөлөөлдөг. Түршилтад ашиглах полимер нэгдлүүд цаас, цавуу, болон бусад нэгдлүүдээр бохирдсон байж болохгүй.

### **Дахин боловсруулсан PET хуванцрыг ашиглан утас болон хөвөн даавуу үйлдвэрлэх технологи**

Хаягдал PET-ийг дахин боловсруулан нэхмэлийн үйлдвэрлэлд утас, даавуу, мяндсан дүүргэгч зэрэг хэд хэдэн материал гарган авахад хэрэглэдэг. Ерөнхийдөө дахин боловсруулсан PET-ийг 6 денирээс дээш хэмжээтэй мяндаст ашигладаг байсан ба одоогоор PET-ийг хамгийн өргөн хүрээнд ашиглаж байгаа салбар нь 1.5-3 денир хэмжээтэй хувцас загварын салбарт хамгийн өргөн хүрээнд ашиглаж байна. Хамгийн анх PET-ийг 3 денирээс бага ширхэглэгтэй салбарт ашиглах технологи 1993 онд гарч ирсэн бол 1998 онд худалдаанд PET-ийг ашиглаж хийсэн бүтээгдэхүүнүүд гарсан.

Өмнө нь утас болон даавууны салбарт PET-ийг тийм ч өргөн хүрээнд ашигладаггүй байсан. Учир нь хаягдал хуванцарт агуулагдах бохирдлууд нь тухайн утас болон мяндасны бат бөх чанарыг бууруулдаг байсан. Гэвч хайлуулан шүүх арга гарч ирсэнээр илүү өндөр чанартай зуурмаг гаргаж авах боломжтой болсон. Энэ технологид ашиглах дахин боловсруулсан PET-ийг гаргаж авахдаа ус болон ундааны савыг цэвэрлэж хатаасны дараагаар хайлуулан бутлагч руу хийнэ. Үүний дараагаар хайлсан хуванцрыг вакуум насосоор шахаж, эргүүлж жигд тарааснаар тор хэлбэрийн мяндас гаргаж авна. Ийм мяндас хэлбэртэй гаргаж авсан бүтээгдэхүүнийг унтлагын хөнжил, дэр зэрэгт дүүргэх материал, тусгаарлагч зэрэг янз бүрээр ашиглах боломжтой. Үйлдвэрлэл явуулахад үндсэн 3 шат дамжлагатай. Үүнд:

1. Хуванцар савнуудыг цуглуулах
2. Хуванцар савуудыг ангилж, ялгах
3. Хуванцарыг жижиглэх
4. PET-ийн бохирдлыг цэвэрлэх, хатаах
5. Хайлуулах

Технологийн үе шатыг Зураг 3-т үзүүлэв.





*Зураг 3. PET ашиглан хөвөн даавуу үйлдвэрлэх технологи*

Эхний 3 процесс нь цаасан шошго болон таглаа зэргийг агуулсан ангилсан хуванцруудыг бутлагч машинд хийж жижиг хэсэг болтол нь бутална. Үүнээс цэвэр PET-ийн жижиг хэсгүүдийг ялгаж авах ба эдгээр нь полиэфирын мяндас гаргаж авах гол түүхий эд болно. Эхний Rosenberger-ийн тайланд дурдсанаар дахин боловсруулсан полиэфир буюу PET-ээс гаргаж авсан мяндаснууд нь тосноос гаргаж авсан шинэ PET-ээс гаргаж авсан мяндаснаас 80%-иар бага энерги харин 90%-иар бага ус ашигладаг болохыг олж тогтоосон. 1 тонн буталсан хуванцрыг угаахад 2-3м<sup>3</sup> ус зарцуулагддаг. Гэсэн хэдий ч одоогоор хуурай цэвэрлэгээ буюу ус ашиглахгүйгээр тухайн хуванцруудыг үрж угаах аргыг өргөнөөр ашиглаж байна. Хайлуулан бутлах процессын үед тухайн хуванцар материалууд гидролизид маш эмзэг байдаг учир чийгийн хэмжээ тухайн материалын механик шинж чанарт нь сөргөөр нөлөөлдөг бөгөөд хайлуулан бутлах процесст оруулахаас өмнө тухайн хуванцрыг маш сайн хатааж чийгийн хэмжээг маш бага болгох шаардлагатай. Тиймээс ч бохирдлоос нь салгасны дараагаар хэд хэдэн хатаах аргуудыг ашигладаг үүнд: чийггүйжүүлэх, инфра-улаан туяагаар шарж хатаах зэрэг орно. Гидролизид орох хуванцрын хэмжээг багасгахын тулд агуулагдаж байгаа усны хэмжээг ррт-ээр хэмждэг. Хатаасны дараагаар тухайн материалуудыг электростатик ялгагчид оруулж металл бохирдлуудаас нь ялгана. Үүний дараагаар эцсийн бүтээгдэхүүн болох мяндас гаргаж авах хэсэг рүү шилжинэ. Хайлуулан шигшиж бохирдлоос нь салгах процессыг бутлан хайлуулах аргын үед хийдэг. Тухайн хуванцруудыг хайлуулж том нүхтэй ган төмөр нүхэн дундуур хайлуулсан хуванцар материалыг урсгах ба энэ үед хайлаагүй

бусад төрлийн бохирдлууд шүүгдэж үлдэнэ. Энэхүү процессыг тухайн материалын цэвэршилтээс хамаарч хэдэн ч удаа хийж болно. Үүний дараа буталсан хуванцруудыг дахин хайлуулж утас гаргаж авах процесс явагдана. Энэ процесст жижиг хэмжээтэй болсон PET хуванцруудыг дахин хайлуулж ээрүүлд оруулж шинэ материалаас гаргаж авдаг нийлэг утас шиг болгоно. Үүнээс гарсан маяндасыг автоматаар хөргөнө. Тухайн гарч ирсэн утасны урт нь ямар төрлийн хэрэглээнд зориулагдсанаас нь хамаарч өөр өөр байж болох ба нэхмэл болон сүлжмэлийн үйлдвэрлэлд хэрэглэх бүрэн боломжтой. Тийм ч учраас PVC болон PC зэрэг мяндсан утсыг даавуун утастай хольж гарган авах боломжтой. Тухайн хуванцруудыг хайлмаг хэлбэртэй байх үед нь өнгө оруулагч нэмснээр төрөл бүрийн өнгөтэй гаргаж авах боломжтой [21].

Дахин боловсруулсан бүтээгдэхүүнээс гаргаж авсан утасны шинж чанар нь ашигласан хуванцрын шинж чанар болон хэрхэн боловсруулсан зэргээс шууд хамаарна.

Хуванцар	Шинэ хуванцрыг боловсруулахад зарцуулах энерги (Мж/кг)	Шинэ хуванцар түүхий эдийн үнэ (\$/кг)	Дахин боловсруулсан хуванцрыг боловсруулахад зарцуулах энерги (Мж/кг)	Дахин боловсруулсан хуванцар түүхий эдийн үнэ (\$/кг)
HDPE	77-85	1.9-2	35-45	0.84-0.97
PP	75-83	1.8-1.85	35-45	0.99-1.1
PET	79-88	2-2.1	60-64	1.1-1.2
PS	96-105	1.5-1.6	40-50	0.75-0.86
PVC	63-70	1.4-1.5	35-40	0.77-0.99

*Хүснэгт 3. Шинэ болон дахин боловсруулсан хуванцрын үнэ болон гаргаж авахад зарцуулагдах энерги.*

Дахин боловсруулсан утас, даавууг ашиглан бүс болон түүний дагалдах хэрэгсэл (холбогч, дэгээ, цахилгаан), гутлын эд анги (улавч) болон брэндийн хувцас зэргийг үйлдвэрлэдэг. Маш олон үйлдвэрлэгчид 1990-ээд оны эхээр хаягдал хуванцар материалыг дахин боловсруулж ашиглах боломжийг үйлдвэрлэлд нэвтрүүлж дэлхий даяар худалдаалж эхэлсэн. Жишээ нь 1992 онд Espirit хамгийн анх органик материалаар хийсэн хувцасны цуглуулга гаргасан ба энэ нь тухайн үед хамгийн анхны органик хаягдлаас гаргаж авсан материалаар хийсэн хувцасны брэнд гэдгээрээ алдартай байсан. Хүснэгт 4-т хаягдал материалаас гаргаж авсан хувцас болон тэдгээрт дагалдах хэрэгслийг брэнд болон материалаас нь хамааруулж харууллаа.

Японы YKK компани хэрэглэгчдэдээ Natulon гэх нэртэй брэндийг санал болгосон ба үүнд металл цахилгааны оронд дахин боловсруулсан PET-ээр орлуулсан цахилгаан бүхий хувцсыг санал болгосон. Дахин боловсруулсан утас ашигласан хувцас болон

дагалдах хэрэгсэл мөн хувцасны цахилгаан зэргийг хэрэглээний дараа үлдсэн хаягдал полиэфир ашиглаж гаргаж авдаг. Мөн энэ төрлийн бүтээгдэхүүнүүд нь нэг ч металл эд анги ашигладаггүй учир мөн амархан дахин боловсруулагдах боломжтой. Natulon брэндээс гаргаж байгаа бүс нь цэвэр дахин боловсруулсан poly (butylene terephthalate)-ээр үйлдвэрлэгддэг.

Материал	Бүтээгдэхүүн	Хаягдлын төрөл	Компани
poly (butylene terephthalate) products	Хувцасны цахилгаан	Хэрэглээний дараах Polyester	Natulon/ҮҮК
poly (butylene terephthalate) products	Бүс	Хэрэглээний дараах Polyester	Natulon/ҮҮК
Эрдэнэ шиш материал	Цахилгаан	Хэрэглээний өмнөх хаягдал	ReEarth/ICI
Polyester	Нөмрөг	Хэрэглээний дараах сүлжмэлийн хаягдал	Collection/H&M
PET	Даавуун өмд	Хэрэглээний дараах дахин боловсруулсан хуванцар хаягдал	Levi;s
PET	Спорт хувцас гутал	Хэрэглээний дараах дахин боловсруулсан хуванцар хаягдал	Nike
Модноос гаргаж авсан утас	Улавч	Дахин боловсруулсан цаас	Adidas
PET	Спорт өмсгөл	Хэрэглээний дараах Polyester	Adidas
PET	Богино түрийтэй оймс	Хэрэглээний дараах Polyester	Asics
Nylon	Усны хувцас	Хэрэглээний дараах nylon хаягдал	Beachwear collection/ Espirit
Мяндас	Цамц, хүрэм	Хаягдал нөмрөг	Shwop coat/ M&S
Даавуу болон PET	Спорт өмсгөл	Хэрэглээний дараах сүлжмэлийн хаягдал	EcoSmart/ Hanes
PET	Биеийн тамирын өмсгөл	Хэрэглээний дараах сүлжмэлийн хаягдал	InCycle/Puma
Хуванцар хаягдал	улавч	Био-задардаг хуванцар	Sustainable Soles/ Gucci

Хүснэгт 4. Хуванцар хог хаягдлаас гаргаж авсан хувцас болон дагалдах хэрэгслүүд ба тэдгээрийн брэнд, үйлдвэрлэж буй компаниуд.

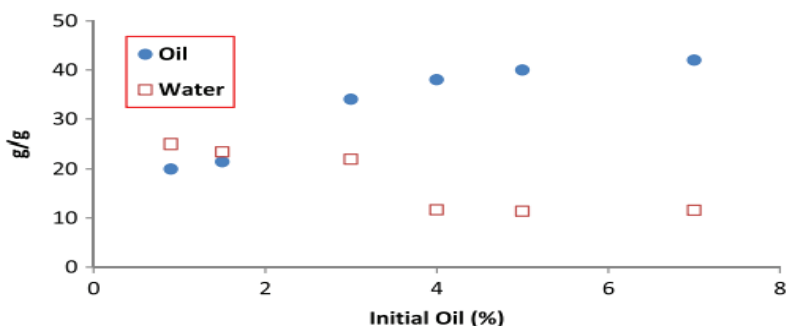
Natulon брэндийн Velcro аяллын гогцоо болон дэгээний нийт агууламжийн 58%-ийг PET эзэлж байна. Мөн түүнчлэн Sofix гэх брэндийн товч нь мөн адил хуванцар эд ангиаг ашигладаг. ICI компанийн ReEarth брэндийн цахилгаан нь эрдэнэ шиш болон бусад ургамлын гаралтай материалаас гаргаж авсан цахилгааныг танилцуулсан ба эдгээр нь буцаад нийгэмд био-задралаар задрах боломжтой материалыг нийгэмд таниулахад өндөр үр нөлөөтэй байна. Patagonia нь хэрэглээний дараах хийжүүлсэн усны хуванцар савыг дахин боловсруулж ноосон даавуу гаргаж авч түүгээрээ гадуур хувцас үйлдвэрлэдэг компани юм. Үүнээс гадна H&M нь өөр нэг тогтвортой ногоон загварыг үйлдвэрлэлдээ нэвтрүүлсэн компани юм. Хамгийн анх 1990 онд органик даавуу утас ашиглаж эхэлсэн Conscious Collection-ийг олон нийтэд танилцуулсан. H&M-ийн 2 дахь загварын цуглуулга болон "Conscious" нь дахин боловсруулсан полиэфир болон органик даавууг ашигладаг. Мөн түүнчлэн эрчүүдэд зориулсан Brick Lane Bikes нь H&M-ээс гаргасан өөр нэг байгальд ээлтэй цуглуулга ба эдгээр хувцсыг үйлдвэрлэхдээ органик даавуу болон дахин боловсруулсан полиэфир, ноосоор хийдэг. H&M-ийн дэлгүүрт ашигладаг стандарт уутнуудын 50%-ийг хэрэглээний дараах полиэтилен эзэлдэг бол үлдсэн 50%-ийн хэрэглээний өмнөх полиэтилен бүрдүүлдэг.

Хаягдал хуванцраас тос болон органик бохирдол шингээгч гарган авах технологи

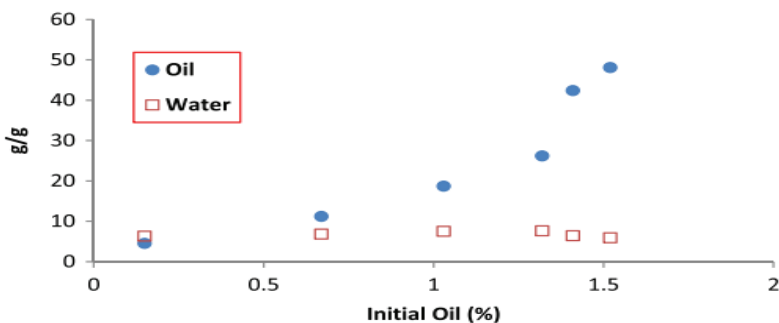
Термо хуванцрууд буюу HDPE, PET, PP, PE зэрэг хаягдал хуванцруудыг ашиглаж хаягдал уснаас тос болон бусад устай үл холилдох бохирдлуудыг ялган авах боломжтой материалуудыг гарган авч хэрэглэх бүрэн боломжтой болсон. Хаягдал хуванцраас гаргаж авсан тос шингээгчийг ашиглаж уул уурхай болон үйлдвэрлэлээс гарсан тос болон органик бохирдлыг цэвэрлэхэд ашигладаг. Энэхүү тос шингээгчийг гарган авахдаа GUR4022N нэртэй, 3.5 сая гр/моль молийн масстай PE-UHMW (хэт өндөр молекул жинтэй полиэтилен) Тикона компанийн бүтээгдэхүүнийг ашигласан. HDPE хуванцар сав, White Protopet 1S Petrolatum, Kaydol White Mineral тос болон Irganox 1010 (антиоксидант) нэгдлүүдийг ашиглан туршилтыг хийжээ. Эрдэнэ шишийн тос болон RMG380 далайн дизель тосыг мөн туршилтад ашигласан. Энэхүү туршилтаар 3 төрлийн хуванцар тос шингээгч материалын технологийг туршсан бөгөөд үүнд: HD-75 (хаягдал HDPE ба хэт өндөр молекул жинтэй полиэтилен (UHMWPE) 75:25 харьцаатай), UH-Pure (цэвэр UHMWPE-ээс тогтсон), HD-сав (хаягдал HDPE хуванцраас бүрдсэн) гэсэн 3 бүтээгдэхүүн гарган авсан байна [22].

Гаргаж авсан тос шингээгч материалыг ус болон тосны холимогт хийж тосыг сонгомлоор ялгаж авах туршилтын үр дүнг зураг 4 болон 5-т харуулсан. HD-75 шингээгчийн хувьд ус болон эрдэнэшишийн тос болон RMG380 тосыг сонгомлоор ялгаж авах туршилтын үр дүнгээс харахад анхны холимогт агуулагдах RMG380 тосны хэмжээ ихсэх тусам холимогос ялгаж авах тосны хэмжээ ихэсч байгаа бол усыг шингээх хэмжээ бараг тогтмол аль эсвэл бага зэрэг нэмэгдэж байна. Харин эрдэнэ шишийн анхны хэмжээ ихсэх тусам HD-75 дээжийн тухайн тосыг шингээх хэмжээ ихэссэн бол шингээх

усны хэмжээ нь багассан байна. Үүнээс тухайн материал нь тодорхой хэмжээний усыг шингээж авдаг боловч шингээгдэж буй тосны хэмжээ их байх тусам усны хэмжээг харьцангуй бага буюу тооцохгүй байж болохоор байна. Мөн Atta болон түүний багийн судалгаанд дурдагдсан PET-ээс гаргаж авсан polyurethane хөөсөнцөртэй харьцуулахад тосыг шингээж авах хэмжээ нь энэхүү судалгаанд хэрэглэсэн HDPE илүү өндөр байна [22].

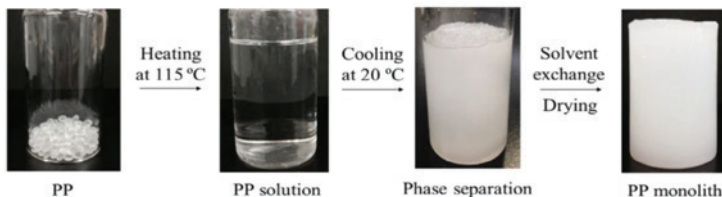


Зураг 4. Эрдэнэ шишийн тос болон усны холимгоос сонгомлоор шингээх үзүүлэлт

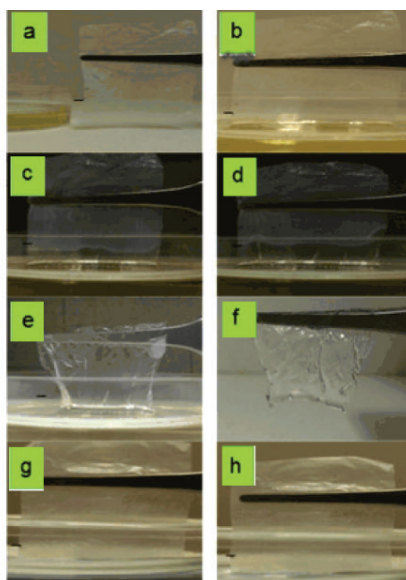


Зураг 5. RMG380 тос болон усны холимгоос сонгомлоор шингээх үзүүлэлт

Мөн PP хөөсөнцрийг хаягдлаас гарган авч тос шингээгч хийх боломжтой байна. Эхлээд 2.8 гр PP-ийг 16мл decalin болон 24мл 1-бутанолын уусмалд 115 оС температурт уусгасан. Тухайн уусмалыг 20оС хүртэл хөргөсөн. Хөргөх процессын үед PP-ийг уусгагчаас нь ялган авч ацетонд хийж гадаргууд нь наалдсан уусгагчаас нь ялгаж цэвэрлэсэн [23].

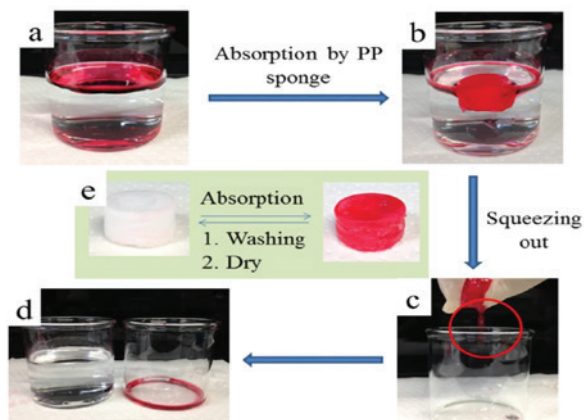


Зураг 6. PP хөөсөнцөр гаргаж авах арга.



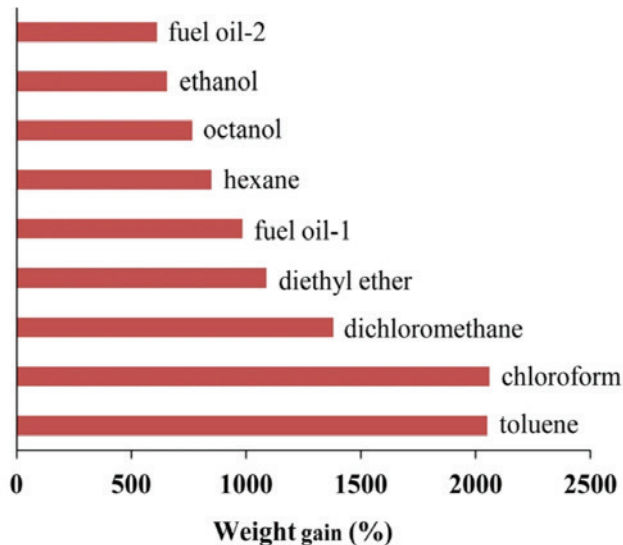
Зураг 7. Гарган авсан тос шингээгч хальс.

Диэтил эфирийг энэхүү туршилтад органик бохирдлоор сонгож авсан ба PP хөөсөнцрийг ус болон улаан өнгийн будагч бодисоор будаж диэтилэфир болон усны холимогт хийсэн. Зураг 8b-д харуулсанчлан тухайн PP хөөсөнцөр диэтилэфирийг ханатал шингээж авсан ч гэсэн усны гадаргуу дээр хөвдөг ба шууд тухайн уусмалаас салгаж авах боломжтой болдог. PP хөөсөнцөрийн нүх сүвд шингээгдсэн органик бохирдлыг мушгиж гарган авсан. PP хөөсөнцөрийн сүвэрхэг бүтэц болон органик бохирдлыг ялгаж авах чадвар нь хэд хэдэн циклийн дараа огтхон ч өөрчлөгдөөгүй байна. Хэрэглэсэн хөөсөнцөрийг ууршимтгай уусмалаар угааж хатаасны дараагаар дахин дахин ашиглах боломжтой (Зураг 8e) [23].



Зураг 8. Диэтилэфирийг уснаас ялгах цикл процесс болон PP хөөсөнцрийг угаах процесс.

PP-ийн хөөсөнцөр шингээгч нь өөрийнхөө жингээс 5-20 дахин их хэмжээний органик бохирдлыг шингээж байсан ба худалдаанд байдаг PP-ээс ч илүү өндөр шингээж байна. PP хөөсөнцөр нь тулоуль болон хлороформ 2-ийг хамгийн их хэмжээгээр шингээж байсан. Үүнээс харахад PP хөөсөнцөр нь их хэмжээний тос болон органик бохирдлыг ялгаж авах түүнийгээ дахин ашиглах боломжтой нэгдэл гэдгийг харж болно [23].



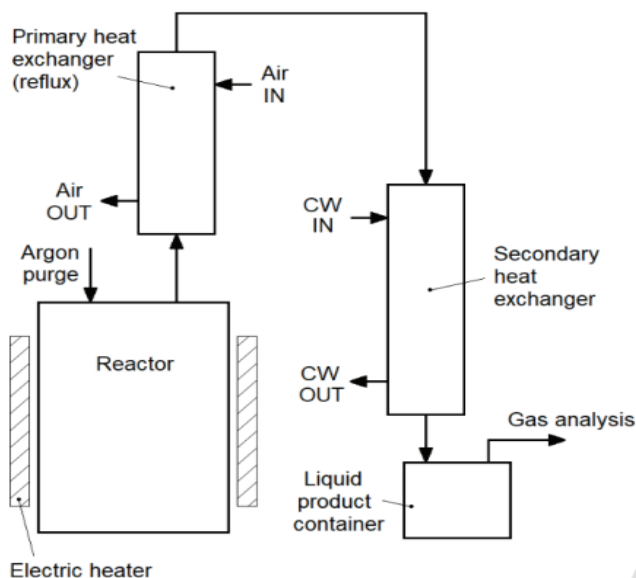
Зураг 9. PP хөөсөнцрийн хэд хэдэн төрлийн органик шингэн болон тос шингээх чадвар.

Хаягдал хуванцраас нүүрс-устөрөгч түлш гарган авах технологи

Хаягдал хуванцарууд болох HDPE, LDPE, PP, PS, PET, PUR-ийг дахин боловсруулан тээврийн хэрэгсэлд ашиглах нүүрс-устөрөгчийн түлш гарган авах боломжтой. Ингэхдээ пиролизын процессыг ашигладаг. Энэ нь хүчилтөрөгчгүй орчинд өндөр температурт халаан хуванцраас шатамхай органик нэгдлийг агуулсан фазыг ялгаж авах технологи юм.

Пиролизын процессыг тодорхой эзлэхүүнтэй хөргүүрийн системтэй реакторт явуулах ба тухайн температур болон хөргөх агаарын урсгалын хэмжээг шууд удирдах бүрэн боломжтой. Тухайн хөргүүрийн систем нь дахин усан хөргүүртэй холбогддог ба ингэснээр буцлах температуртаа хүрсэн хуванцраас гарч байгаа хийн молекул хөргүүрийн тусламжтай конденсацид орно. Хоёр давхар хөргүүр ашигласанаар нүүрс устөрөгчийн түлшний гарцыг нэмэгдүүлэх мөн цаашлаад тухайн системийг илүү сайн хянах боломжийг олгодог. Пиролизоос гарсан шингэн тосыг саванд цуглуулж харин түүнээс гарсан бусад хий нь шатаах хэсэг рүү шилждэг. Зураг 10-д пиролизын процесс явагдах системийг харууллаа. Энэхүү реакторт пиролизын процесс явуулахаас өмнө аргоны хийг шахаж тухайн системд агуулагдаж буй хүчилтөрөгчийг зайлуулна. Аргон хийгээр системийг цэвэрлэсний дараагаар температурыг нэмэх ба 700°C хүртэл халаана.

Инертийн хийн орчинд хийгддэг TG Болон DTG анализын үр дүнд үндэслэж реакторын доторх температур 540 °C хүрэх үед пиролизыг зогсоодог [24].



Зураг 10. Пиролиз явуулах реакторын схем.

Доорх хүснэгтэд пиролизоос гарч байгаа хийн найрлагыг харуулав.

### Хүснэгт 5. Хуурай пиролизоос гарсан хийн найрлага.

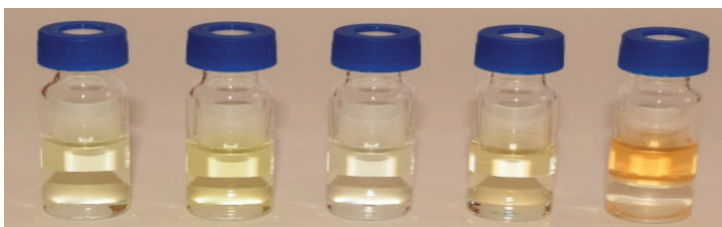
Нэгдэл	Агуулга	Концентраци					
		HDPE	LDPE	PP	PET	PS	PUR
CO <sub>2</sub>	440	1.6	1.37	1.37	35	6.52	76.1
H <sub>2</sub>	1070	<0.107	<0.107	<0.107	<0.107	<0.107	<0.107
H <sub>2</sub> S	5000	1.24	12.3	<0.5	<0.5	11.5	3.85
CO	920	0.82	0.58	0.73	40	6.48	1.8
CH <sub>4</sub>	240	16.8	15.3	11.9	1.74	39.6	4.74
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2	19.4	13.7	15	0.05	11.8	2.43
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2	16.5	15.4	2.82	1.62	12	0.48
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2	12.1	8	6	0.03	4.33	1.13
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1	17.9	9.77	38	0.07	6.56	5.29
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.04	<0.0001	<0.0001
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (iso)	4	0.15	1.94	0.36	<0.0004	0.12	0.03
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (norm)	1	0.11	1.43	0.25	<0.0001	0.09	0.02
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	1	2.08	0	0.41	0.01	0.78	0.11
Бусад		11.3	20.2	23.2	21.4	0.2	4



HDPE (85.0%), LDPE (65.5%), PP (74.7%) and PS (75.3%) зэрэг хуванцруудыг пиролизд оруулах үед өндөр хэмжээний C1-C4 нүүрс үстөрөгчийн шатамхай хий ялгарсан бол харин PET болон PUR-ээс гарсан бүтээгдэхүүний ихэнх хувийг CO болон CO<sub>2</sub> хий ялгарч байсан. PP-ийн хувьд хамгийн их хэмжээний мономер буюу 38% C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-ийг ялгаруулсан бол харин PS-ээс хамгийн өндөр хэмжээний метан ялгарсан байна. C1-C3 агуулсан нүүрс үстөрөгчийн түлш нь LDPE болон HDPE зэрэг хуванцруудаас үүсч байсан ч бага хэмжээний C4 агуулагдаж байна. Энэхүү ялгарч байгаа хийг ахуйн хий болон шатамхай хийн зориулалтаар ашиглах боломжтой. PET-ийн молекул бүтцэд агуулагдах хүчилтөрөгчөөс болж пиролизоос үүссэн шатамхай нэгдлүүд исэлдэж их хэмжээний CO болон CO<sub>2</sub> үүсч байна.

Харин пиролизоос ялгаж авсан тосыг дахин 3 ялгаатай температурт нэрж дизель түлш болон бензин гаргаж авдаг. PET-ээс органик тос ялгараагүй учир үргэлжлүүлэн нэрлэг хийх боломжгүй.

HDPE болон LDPE, PS-ээс гаргаж авсан тос их хэмжээний нүүрс үстөрөгчийн дизель түлш болон бензин агуулдаг. Пиролизоос гарсан PS-ийн тосыг 20-200°C-д нэрэх үед 89 хувь нь бензин болдог нь бусад хуванцартай харьцуулахад хамгийн өндөр агууламжтай байгааг харуулж байна. Харин PP-ийн пиролизоос ялгаж авсан тос 80,2%-ийн бензин агуулж байсан нь HDPE, LDPE болон PS-тэй харьцуулахад хамгийн бага байсан. PUR хуванцрын хувьд 20-200°C-д нэрэх үед гарах фракцын хэмжээ 63,9% байсан ч пиролизын тосноос нэрсэн бүтээгдэхүүнд их хэмжээний ус агуулагдаж байсан ба зураг 11-ээс харж болохоор байна. Зураг 11-д харуулсан дээжийн усыг ялгаж авч болох ба зөвхөн дээд хэсэгт байгаа фазыг дизель түлш буюу бензин болгон ашиглана [24].



*Зураг 11. 20-200°C-д нэрж гарган авсан бүтээгдэхүүнүүд. Зүүнээс баруун гар тал руу HDPE, LDPE, PP, PS, PUR.*

Харин HDPE, LDPE, PP, PS-ийн пиролизоос гарсан тосыг агаарт нэрэх үед харгалзан бензиний фракцын агууламж 37.3%, 40.8%, 42.1% болон 70.5% байсан бол харин дизель түлшний агууламж 30.5%, 15.2%, 24.8% болон 1.1% байсан [24].

Гаргаж авсан бензинийг хийн хроматографик GC-MS болон дотоод шаталтын хөдөлгүүрт хэрэглэж туршиж үзсэн. HDPE, LDPE, PP болон PS-ээс гаргаж авсан бензинийг дотоод шаталтын хөдөлгүүрт хэрэглэх үед тогтвортой ажиллаж байсан бол харин уснаас нь ялгаж авсан PUR-ээс нэрсэн бензинээр ажиллуулах үед хэвийн горимоор ажиллах

боломжгүй болсон. Харьцуулах бензин буюу худалдаанд байгаа RON=95 бензинтэй харьцуулахад PS-ээс гаргаж авсан бензинийг ашиглахад тухайн хөдөлгүүрийн бензин зарцуулалт 9.1-9.4%-иар буурсан байна. Харин HDPE-ээс гаргаж авсан бензин түлшний хэрэглээг 6.1-7.8%, LDPE нь 5.6-6.3% байсан бол PP нь 1.2-2.0%-иар бууруулсан байна. Харьцуулах дээжтэй харьцуулахад PS бензинийг хэрэглэсэн үед  $NO_x$  нэгдлийн ялгаруулалт 82-147%-иар ихэссэн бол CO-ийн ялгаруулалт 91-96%-иар буурсан байна. PP нь  $NO_x$ -ийн ялгаруулалтыг 3.7-5.4%-иар бууруулсан ба бусад хуванцраас гаргаж авсан бензинтэй харьцуулахад хамгийн бага CO хийг ялгаруулж байсан. Үүнээс харахад хаягдал хуванцрыг пиролизд оруулж шингэн түлш гаргаж авах нь үр дүнтэй технологи ба хогийн цэгт хуримтлагдсан хуванцар хаягдлыг бууруулах хамгийн үр дүнтэй арга болох нь харагдаж байна [24].

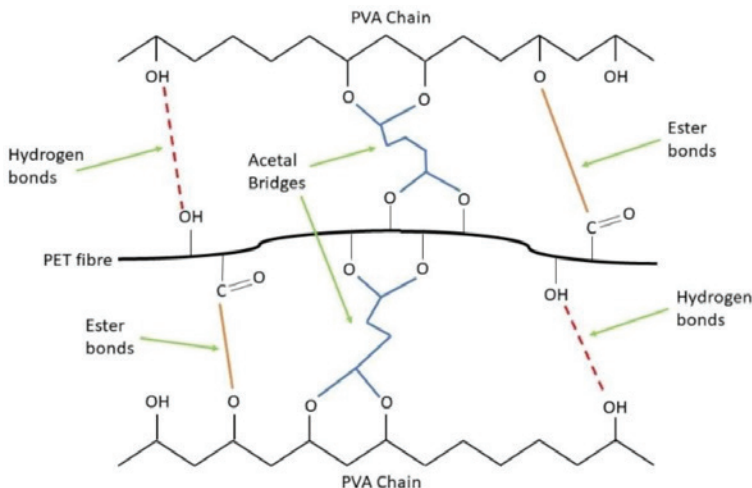
### Хаягдал хуванцраас аэрогель гарган авах технологи

Энэ нь хэт бага нягттай, сүвэрхэг бүтэцтэй тусгаарлагч материал гарган авах технологи юм. Энэ материалыг дулаан тусгаарлагч, дуу тусгаарлагчаар ашиглах боломжтой.



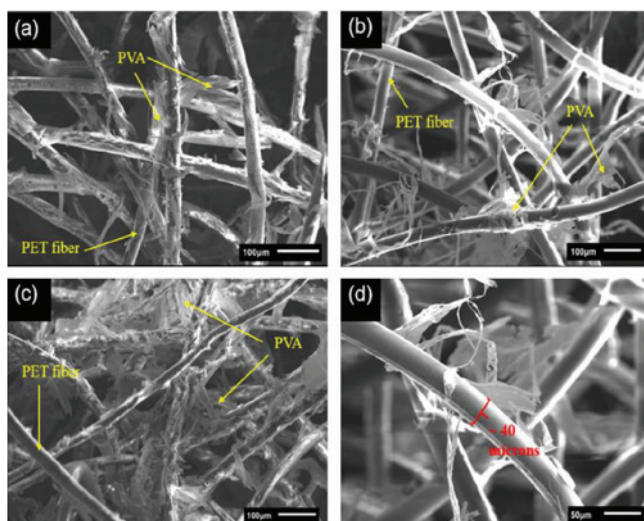
Зураг 12. Аэрогель гарган авах технологи.

**Аэрогелийг гарган авахдаа** дахин боловсруулсан PET-ийн фиберыг NaOH-ын уусмалаар үйлчилж гадаргуу дээр нь карбоксил болон гидроксил бүлгийг суулгаж өгнө. Гарган авахдаа дахин боловсруулсан 1гр PET-ийг 4%-ийн агууламжтай NaOH-ийн 100мл уусмалд дүрнэ. Гидролизын урвалыг хурдасгахын тулд тухайн уусмалыг 80°C температурт зууханд 1 цагийн турш халаана. Дахин боловсруулсан PET-ийг нэрмэл усаар сайтар зайлж NaOH-оос нь бүрэн салгаж PVC болон GA (Glutaraldehyde) болон нэрмэл усны уусмалтай холино. PET:PVA:GA-ийн харьцаа харгалзан 10:1:0.02 байхаар уусмалыг найруулна. Тухайн уусмалын pH буюу орчныг тогтворжуулахын тулд 37%-ийн концентрацитай давсны хүчлийн уусмалыг нэмж pH=3 байхаар тохируулна. Үүний дараагаар уусмалыг хэт авиагаар үйлчилж нэгэн жигд уусмал болгоно. Дараа нь тухайн уусмалыг 80°C-д 3 цаг байлгасны дараагаар шууд хөргөгчинд хийж хөлдөөнө. Хөлдсөн дээжийг хуурай хөлдөөгчид хийж 48 цагийн турш байлгаж усны агууламжийг салгаж аэрогель үүсгэнэ. Дахин боловсруулсан PET аэрогелийг гаргаж авахдаа 3 ялгаатай PET-ийн концентрацийг ашигласан ба үүнд жингийн 0.5, 1, 2 хувь байхаар сонгож авсан ба харин тухайн фиберын урт 32мм х 64мм байсан. Дахин боловсруулсан PET болон Поливинилалкахол (Polyvinylalcohol PVA)-ийн хооронд үүсэх үстөрөгч болон эфирийн холбоо болон холбогч болох glutaraldehyde (GA) хооронд үүсэх ацетал гинжин холбооны тусламжтайгаар аэрогель үүсдэг. Барьцалдуулах процессын үед PET-PVA хооронд үүссэн матрицаас болж тухайн аэрогелийн механик шинж чанар болон тогтворжилт сайжирдаг.



Зураг 13. rPET fiber, PVA болон GA хооронд үүсэх химийн холбоо ба аэрогелийн бүтэц.

Зураг 14-д ялгаатай 3 концентрацитай гарган авсан PET-ийн аэрогелийн электрон микроскопын зургийг харууллаа. PET-ын хэмжээ (0.5, 1, 2 wt%) нэмэгдэх тусам илүү нягтаршил өндөртэй болсон байна. Электрон микроскопын зургаас харахад аэрогелийн гадаргуу дах PET фиберын диаметр ойролцоогоор 40мкм хэмжээтэй байсан. PVA холбогч нь PET фиберын гадаргууг бүрхэж хооронд нь нягт холбож байна.



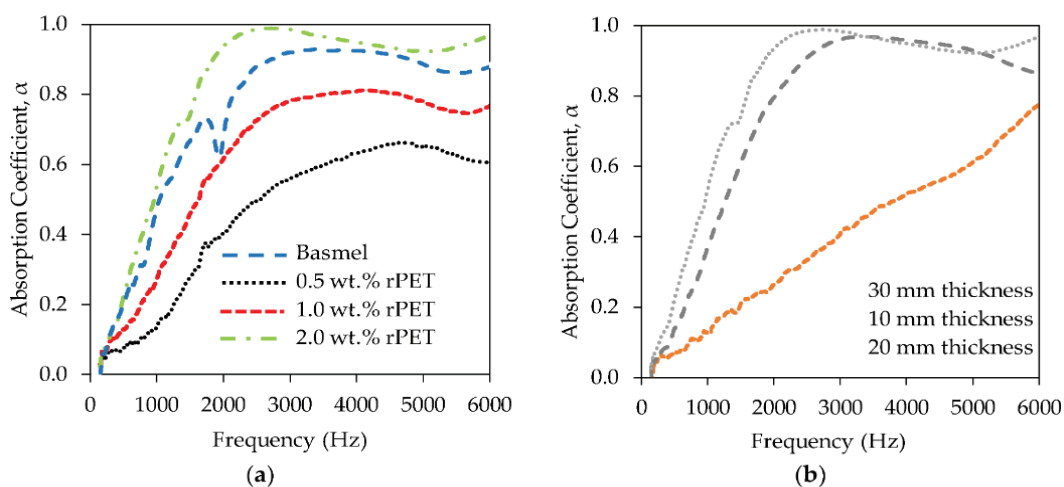
Зураг 14. Ялгаатай PET концентрацитай аэрогелийн SEM зураг. (a) 0.5 wt.%; (b) 1.0 wt.%; and (c) 2.0 wt.%; and (d)PET-ын бүтэц.

Ялгаатай концентрацитай PET аэрогелийн сүвэрхэг шинж чанар нь 98.3-99.5% байсан ба маш бага нягттай буюу 0.007-0.026 г/см<sup>3</sup>-ын хооронд байсан. Тухайн гаргаж авсан ялгаатай 3 дээжийн үр дүнг хүснэгт 6-д үзүүллээ. PET-ийн хэмжээ ихсэх тусам тухайн аэрогелийн нягт ихэсч сүвэрхэг шинж чанар буурсан ба үүнийгээ дагаад нүхний хэмжээ буурсан байна. Гэсэн хэдий ч тухайн ашигласан PET фиберын динерийн хэмжээ болон уртыг ялгаатай байхаар сонгож авсан боловч урвалд орж байгаа PET-ийн хэмжээ ижил үед эдгээр параметрууд нь тухайн аэрогельд ямар нэгэн мэдэгдэхүйц өөрчлөлт үзүүлээгүй байна.

**Хүснэгт 6. Гаргаж авсан PET аэрогелийн нягт болон сүвэрхэг шинж чанар.**

Дээж	Файбер урт (мм)	Файбер динер	Файбер Концентраци (wt%)	Зузаан (мм)	Нягт, ρ (г/см <sup>3</sup> )	Сүвэрхэг шинж чанар, (%)
1	64	7D	0.5	30	0.007±0.001	99.47±0.05
2	64	7D	1.0	30	0.0014±0.001	99.00±0.05
3	64	7D	2.0	30	0.0026±0.001	99.14±0.05
4	64	3D	2.0	30	0.0024±0.001	99.26±0.05
5	64	15D	2.0	30	0.0024±0.001	99.26±0.05
6	32	15D	2.0	30	0.0024±0.001	99.26±0.05
7	64	7D	2.0	10	0.0024±0.001	99.23±0.05
8	64	7D	2.0	20	0.0024±0.001	99.25±0.05

Зураг 15а-д ялгаатай PET-ийн концентрацитай боловч ижил 7D денир хэмжээтэй, 64мм үрттай файбер ашигласан аэрогелийн дуу тусгаарлах үр дүнг харууллаа. Үр дүнгээс харахад 30мм зузаантай аэрогелийг тусгаарлагч материалаар ашиглах үед тухайн дээжид агуулагдаж байгаа PET-ийн концентраци нэмэгдэх тусам шингээлтийн коэффициент нэмэгдэж байсан. PET-ийн хэмжээ нэмэгдэх тусам тухайн аэрогелийн нэгж талбайд оногдох файбер PET-ийн хэмжээ мөн адил нэмэгддэг ба файбер-файберийн хоорондох харилцан үйлчлэл нэмэгддэг. Тухайн файберын дундуур дууны долгион нэвтрэх үед дотоод ойлт болон гадаргуун үрэлт, дотоод харилцан үйлчлэлд орж дууны долгионы энерги буурдаг. Үүнээс болж аэрогелийн орчны дууг шингээх шингээлт нэмэгддэг. Ялгаатай PET-ийн концентрацитай аэрогель дундаас жингийн 2%-ийн PET-ийн агууламжтай аэрогель нь хамгийн өндөр дууг шингээх шинж чанартай байна. 2%-ийн PET-ийн агууламжтай аэрогель нь бүхий л долгионы үрттай дууны долгионыг 1%-ийн агууламжтай аэрогелиэс 20-30%-иар илүү шингээж байсан. Үүнээс гадна 2000–2500 Гц давтамжтай дууны долгионыг шингээх туршилтыг худалдаанд байгаа Basmel материалтай харьцуулж үзэхэд PET-ээс гаргаж авсан аэрогелийн шуугиан бууруулах коэффициент нь 20%-иар илүү байсан.



Зураг 15. rPET-ээс гаргаж авсан аэрогелийн дуу тусгаарлах шинж. (a) Ялгаатай PET-ын концентрацитай аэрогелийн дууны долгионы шингээлт (7D денир хэмжээтэй, 64мм үрттай, 30мм зузаан); (b) Ялгаатай зузаантай аэрогелийн дууны долгионы шингээлт (7D денир хэмжээтэй, 64мм үрттай, жингийн 2% PET агууламжтай).

Зураг 15b-д ялгаатай зузаантай аэрогелийн дууны долгионыг шингээх шингээлт (7D денир хэмжээтэй, 64мм үрттай, жингийн 2% PET агууламжтай)-ийг харууллаа. Бага давтамжтай дууны долгионыг 30мм зузаантай аэрогель хамгийн өндөр шингээж байсан буюу 20мм зузаантай дээжээс 15-20% илүү шингээж байна. Бага давтамжтай дууны долгион илүү үрт долгионы үрттай байдаг учир аэрогелийн зузаан нэмэгдэх тусам

илүү ихээр шингээгддэг. Аэрогелийн зузааны хэмжээ их давтамжтай буюу 3000 Гц-ээс өндөр давтамжтай дууны долгионыг шингээх хэмжээнд бараг нөлөөлөхгүй байв. Өндөр давтамжтай дууны долгионыг шингээх шингээлтийн хамгийн өндөр утгад очоод буцаж бүүрч байгаа нь тухайн аэрогель дотор ойж байгаа дууны долгионтой нэвтэрч байгаа дууны долгионы давхцалаас болж шингээлтийг бууруулж байгаатай холбоотой.

Хүснэгт 7-д ялгаатай PET-ийн концентрацитай аэрогелийн дулаан дамжуулалтыг харууллаа. Үүнээс харахад PET-ээс гаргаж авсан аэрогель нь өндөр сүвэрхэг шинж чанартай учир маш бага дулаан дамжуулалт буюу 0.035-0.038Ват/м байгааг харж болохоор байна. Орчны температур болон даралтын нөхцөлд тухайн аэрогелийн нүх сүвэнд агуулагдах агаар нь дулаан тусгаарлагч шинж чанарыг нэмэгдүүлж дулаан дамжуулалтыг бууруулана. Хүснэгт 2-оос харахад аэрогель дахь PET-ийн хэмжээг 0.5-2% хүртэл ихэсгэх үед дулаан дамжуулалт 0.035-0.037Ват/мК хүртэл ихэссэн ба цэвэр PET-ийн дулаан дамжуулалт 0.15Ват/мК-аас 5 дахин буурсан байна. Харин нягт нь 0.007–0.026 г/см<sup>3</sup> хүртэл өссөн. PET файберын урт болон нягтаас хамаарч дулаан дамжуулалт өөрчлөгдөхгүй.

***Хүснэгт 7. Дахин боловсруулсан PET-ээс гаргаж авсан аэрогелийн дулааны дамжуулал болон Юнгийн модул.***

Дээж	Файбер Концентраци (wt%)	Нягт, ρ (г/см <sup>3</sup> )	Дулаан дамжуулал K <sub>дулд</sub> (Ват/мК)	Юнгийн модул E (кПа)
1	0.5	0.007±0.001	0.035±0.001	1.16±0.05
2	1.0	0.0014±0.001	0.036±0.001	1.76±0.08
3	2.0	0.0026±0.001	0.037±0.001	2.76±0.16
4	2.0	0.0024±0.001	0.037±0.001	2.87±0.17
5	2.0	0.0024±0.001	0.038±0.001	2.61±0.17
6	2.0	0.0024±0.001	0.037±0.001	2.45±0.21

PET-ээс гаргаж авсан аэрогелийн дулаан дамжуулал 0.035–0.038 Ват/мК байсан ба худалдаанд байгаа цахиурын аэрогелийн дулаан дамжуулал (0.036–0.417 Ват/мК) болон цахиур-целлюлозын аэрогелийн дулаан дамжуулал (0.039–0.041 Ват/мК) байдгаас бага байна. Мөн PET-ийн аэрогелийг худалдаанд байгаа дулаан тусгаарлагч материалууд болох polyurethane (0.02–0.04 Ват/мК), mineral wool (0.035 Ват/мК) and polystyrene (0.034 Ват/мК)-тай харьцуулахад ойролцоо хэмжээнд байна.

Байгаль орчинд ээлтэй дахин боловсруулсан PET-ээс дулаан болон дуу тусгаарлагч аэрогелийг хуурай хөлдөөх аргаар гаргаж авах бүрэн боломжтой байна. PET-ээс гаргаж авсан аэрогель материал нь маш бага нягттай ( $0.007-0.026 \text{ г/см}^3$ ), ба дулаан дамжуулалт ( $0.035-0.038 \text{ В/мК}$ ) багатай, уян харимхай шинж чанар сайтай, өндөр сүвэрхэг (98.3–99.5%), шинж чанартай. Үүнээс үндэслэж цаашлаад дулаан болон дуу тусгаарлагч, тос шингээгч, эмнэлгийн хэрэгсэлд ашиглах бүрэн боломжтой.

## АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] T. Hundertmark, M. Mayer, C. McNally, T. Jan Simons, C. Witte, How plastics waste recycling could transform the chemical industry, 2020.
- [2] Plastics Europe. Plastics – the Facts, 2019
- [3] J.Brahney, M.Hallerud, E.Heim, M.Hahnenberger, S.Sukumaran, Science 2020, 368, 127.
- [4] Maxine Swee-Li Yee, Ling-Wei Hii, Chin King Looi, Wei-Meng Lim, Shew-Fung Wong, Yih-Yih Kok, Boon-Keat Tan, Chiew-Yen Wong, and Chee-Onn Leong Nanomaterials, 11, 496, 2021.
- [5] H. Thomson, K. Illingworth, H. McCoach, M. Jefferson, S. Morgan, Based on Analysis of UK Grocery Packaging Data from – PlasticFlow 2025: Plastic Packaging Flow Data Report
- [6] European Council, Conclusions from Special Meeting of the European Council (17, 18, 19, 20 and 21 July 2020),
- [7] European Parliament and Council, Off. J. Eur. Union 2008, 51, 3.
- [8] CEWEP. Landfill taxes and bans overview, 2020.
- [9] A. Chruszcz, S. Reeve, WRAP, Composition of Plastic Waste Collected via Kerbside
- [10] M. Avella, E. Bonadies, E. Martuscelli, R. Rimedio, Polym. Test. 2001, 20, 517.
- [11] J. Kirchherr, D. Reike, M. Hekkert, Resour., Conserv. Recycl. 2017, 127, 221.
- [12] J. Kirchherr, L. Piscicelli, R. Bour, E. Kostense-Smit, J. Muller, A. Huibrechtse-Truijens, M. Hekkert, Ecol. Econ. 2018, 150, 264.
- [13] J. C. Prata, A. L. P. Silva, T. R. Walker, A. C. Duarte, T. Rocha-Santos, Environ. Sci. Technol. 2020, 54, 7760.
- [14] Nor azah Yusof, Nor Dyana Zakaria, Nor Amirah Mohd Maamor Abdul Halim Abdullah International Journal of Molecular Sciences 14, 2013 3993-4004
- [15] Jasim Hadi Ghazi Faisal Najmuldeen, Iqbal Ahmed Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly 2014, 20, 163-170
- [16] Jia-Horng Lin 1,2,3, Yi-Jun Pan 4, Chi-Fan Liu 5, Chien-Lin Huang 6, Chien-Teng Hsieh 7, Chih-Kuang Chen 8, Zheng-lan Lin 1 and Ching-Wen Lou Materials, 2015
- [17] Iprabowo, Jnur Pratama, M Chalid Materials Science and Engineering 2017, 223
- [18] Fatma Zohra Benabid, Nkharchi, Foued Zouai, Abdel-Hamid Ismail Mourad Polymers and Polymer Composites, 2019, 27, 389-399
- [19] Saad Alshahri, Mohammed Alsuhybani, Elid Alosime, Mansour Almurayshid, Alhanouf Alrwais, Salha Alotabi, Polymers, 2021, 13, 3081.
- [20] Lin JH, Pan Yj, Liu CF, Huang CL, Hsieh CT, Chen CK, Lin Zi, Lou CW Materials, 2015, 8, 8850-8859
- [21] Shamsuzzaman Rasel, Joy Sarkar, Manufacturing of fabric by recycling plastic bottles: An ecological approach Part 2: Manufacturing Process, 2019.
- [22] Junaid Saleem, Gordon McKay, Asia-Pac. J. Chem. Eng, 2016,
- [23] Junaid Saleem, Muhammed Adil Riaz, Gordon, Mckay, Journal of Hazardous Materials, 2018, 341, 424-437.
- [24] Zsolt Dobó, Zsófia Jakab, Gábor Nagy, Tamás Koós, Katalin Szemmelveisz, Gábor Muránszky, Energy, 2019, 189.
- [25] Hong Wei Koh, Duyen K. Le, Gek Nian Ng, Xiwen Zhang, Nhan Phan-Thien, Umeyr Kureemun, Hai M. Duong, Gels, 2018 4, 43.