



JUHTUMIANALÜÜS: ENERGIAKULU ANALÜÜS PÕLLUMAJANDUSTOODANGU VÄÄRINDAMISEL TALUS AUTOKLAAVI ABIL

CASE REPORT: ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION AT PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTION BY USING AN AUTOCLAVE ON A FARM

Veli Palge¹, Andres Grigor²

¹Eesti Maaülikool, tehnikainstituut, energiakasutuse õppetool, Fr. R. Kreutzwaldi 56, 51006 Tartu

²Filter AS, Ilmatsalu 1, 50412 Tartu

Saabunud: 17.10.2019
Received:
Aktsepteeritud: 13.11.2019
Accepted:

Avaldatud veebis: 29.11.2019
Published online:

Vastutav autor: Veli Palge
Corresponding author:
E-mail: veli.palge@emu.ee

Keywords: energy consumption,
autoclave, food product.

doi: 10.15159/jas.19.14

ABSTRACT. The purpose of this article is to analyze the causes and distribution of autoclave energy consumption between the various stages of the technological process and identify ways to reduce energy costs. It was found that the recovery of waste heat is the most effective way to reduce energy consumption.

© 2019 Akadeemiline Põllumajanduse Selts. | © 2019 Estonian Academic Agricultural Society.

Sissejuhatus

Maamajanduses talude tulude suurendamiseks kasulik realiseerida on töödeldud produkti. Võrreldes linnas asuva tehasesse ümbertöötlemise koondamisega hajutab taludes-farmides toodangu töötlemine reostuskoormust, tekitab maapiirkonnas töökohti. Produktide tootmiskohal ümbertöötlemine vähendab bioloogiliste toorainete riknemist ja produktide ümbertöötlemine säästliku tehnoloogiaga vähendab energia- ja veekulu võrreldes toiduainete töötlemisega tarbimiskohtades (kodudes, toitlustusettevõtetes). Mõlemad efektid on olulised puhta looduse säilitamiseks.

Talude-farmide toodangu ümbertöötlemine hoidisteks või poolfabrikaatideks on seotud toorproduktide kuumutamise (allpool termini "produkt" all mõeldakse viljapuudelt, marjapõõsastelt korjatud saadusi, samuti ka juurvilju ja loomakasvatussaadusi). Produkte on võimalik kuumutada elektrotehnoloogia vahenditega: takistuskuumutuse ja dielektrilise kuumutuse tehnoloogiate abil, kuid rohkem on levinud autoklaavide kasutamine. Põhjuseks on autoklaavide kasutamise võimalus erisuguse olemusega produktide ja erinevate

taarade kasutamise korral. Autoklaavides produktide suurte koguste töötlemisel kaasnevad ka suured energia ning joogivee kvaliteediga vee kulud, kuigi tooteühiku kohta on need kulud väiksemad kui toiduainete/põllumajandusproduktide töötlemisel tarbimiskohtades (näiteks toitlustusettevõttes või kodus). Kaasajal seostatakse energia kasutamist CO₂ emissioonidega ja kliima soojenemisega. Seetõttu vastavalt kaasaegsetele tõekspidamistele on ka autoklaavide kasutamisel vaja leida võimalusi energiakulude vähendamiseks.

Energiakulude vähendamise eestvedajad on ühiskondlikud- ja maailmaorganisatsioonid kelle initsiatiivil juhivad valitsused seaduste kaudu elukorraldust. On organiseeritud palju nõupidamisi ja vastu võetud otsuseid (Euroopa Liidu Teataja C 487/24 28.12.2016), (ENMAK 2030). Varem või hiljem jõuab nende organisatsioonide tähelepanu ja seadusandlus ka Eestis põllumajandusproduktide töötlemisel kasutatavate tehnoloogiateni. See on käesoleva artikli loomise põhjus.

Toorainete ettevalmistusel nende töötlemiseks autoklaavides on vaja joogivee kvaliteediga vett, mis peale tehnoloogilise protsessi läbimist satub linnas asuva tootmisettevõtte korral kanalisatsiooni ja suunatakse



selle kaudu puhastusseadmetesse. Näiteks linnas asuvas ettevõttes "aastas jääb kasutamata heitsoojusenergiat üle 9000 GJ" (Grigor, 2019, lk 8) ja jahutusvett kasutati "päevas keskmiselt 326 m³" (Grigor, 2019, lk 15) ning see suunati kanalisatsiooni.

Talu tingimustes tekib filosoofiline probleem: mis-sugusel määral põllult või marjapõdsastelt võetud produktiga kaasnevad mullaosad ja taimede osad Eesti hõreda asustuse tingimustes loodusesse tagasi suunates reostavad loodust (need olid ju enne looduses ja nende olemus produkti pesemise käigus ju ei muutu), eriti kui neid tahkeid jäätmeid komposteeritakse ja pesuveesi saadetakse settetiiki või biopuhastisse.

Materjal ja meetodika

Autoklaavi tööparameetrite väärtuste määramisel on kasutatud soojustehnika põhimõtteid, mis on kirjeldatud allikas Holman, 2010, HEAT TRANSFER (Holman, 2010).

Alljärgnevalt vaadeldakse hoidiste valmistamisega seostuvat kahte aspekti: energiakasutust ja veekasutust.

Vaadeldavas tekstis analüüsitakse ligikaudu 2 m³ kambri mahuga autoklaavi tööga seostuvaid iseloomustussuursusi. See autoklaav mahutab ligikaudu 600 kg väikestes pakendites produkti. Vaadeldakse juhtu, kui töödeldavat produkti soojendatakse 130 °C auruga 15 minutiga ligikaudu 110 °C-ni absoluutsel rõhul 2 bar (0,2 MPa) ja hoitakse sellel temperatuuril 15 min. Peale seda jahutatakse produkt külma veega kuni 50 °C-ni ja võetakse autoklaavist välja ning peale lühiajalist jahtumist pakendatakse turustamiseks.

2 m³ kambri mahuga autoklaav on talus kasutamiseks sobiv. Ligikaudu omab selliseid mõõde kaasaegne autoklaav "Cascading water Steriflow shaka" (Steriflow, 2019). Selles kasutatakse produkti loksutamist pastöriseerimise/steriliseerimise ajal, mille tulemusena protsessi kestus lüheneb oluliselt, sest materjal soojeneb mahu ulatuses ühtlasemalt.

Autoklaavi kasutamise tehnoloogia sisaldab järgmisi operatsioone:

1. *Töödeldava materjali ettevalmistamine autoklaavi konteinerisse paigutamiseks: tooraine pesemine, puhastamine, ettevalmistatud produkti taarasse paigutamise.* Vaadeldava teema seisukohast on tehnoloogilise protsessi selle etapi olulisim küsimus puhta vee kasutamise viis: kas puhast vett kasutatakse ainult ühekordselt või vett puhastatakse peale kasutamist ja kasutatakse uuesti. Nende operatsioonide sooritamise viis, abivahendid ja veekulu sõltuvad töödeldavast materjalist. Näiteks on need oluliselt erinevad marjade ja juurviljade korral. Tehnoloogilise protsessi sellel etapil kasutatakse pesemiseks palju vett, kuid kogu tehnoloogilises protsessis selle operatsiooni energiakulu moodustab väikese osa kogu protsessi energiakulust, sest vett soojendatakse vaid 15 °C-ni. Kaevust võetavat veehulka on autoklaaviga seostuvates protsessides lihtsate vee puhastusseadmete kasutamise vähendada, sest on võimalik vee korduvkasutus. Võrreldes toorprodukti tarbimiskohtadel (kodudes,

restoranides) kulutatava veekogusega on suurte koguste töötlemisel loodusest võetav veekogus valmisprodukti massiühiku kohta oluliselt väiksem ja vastavalt sellele ka looduse reostus. Veekulu materjali ettevalmistamisel muutub suurtes piirides sõltudes produktist ja tehnoloogiast. Allpoolsitatud arvutustes arvestame 1 liitri 15 °C vett produkti 1 kg kohta. Kui kaevuvee temperatuur on 7 °C, siis vett on vaja soojendada töötajate tervislike tingimuste tagamiseks vähemalt 15 °C-ni. 600 kg produkti kohta kulub seoses sellega energiat 20 160 kJ ehk 5,6 kW·h.

2. *Autoklaavi ja konteineri(te) ettevalmistamine neisse produkti paigutamiseks.* Jällegi on oluline puhta vee kasutamise tehnoloogia. Autoklaavi konteinerite ettevalmistus seisneb vajaduse korral nende pesus. Selle operatsiooni energiakulu on väike. Valitud parameetritega autoklaavi jaoks ja vee kulul 0,05 m³ on vaja vaid 0,56 kW·h energiat, mis kulub 7 °C kaevuvee soojendamiseks 15 °C-ni. Kuid jällegi tuleks kaaluda vee korduvkasutust.

3. *Produkti paigutamine konteineritesse ja produkti sisaldavate konteinerite laadimine autoklaavi.* Vett sellel etapil ei kasutata ja vaadeldava teema seisukohast tuleks tähelepanu pöörata vaid selle operatsiooni juures energia kasutamise määrale. Selles operatsioonis kulutavad energiat lühiajaliselt vaid väikese võimsusega elektrimootorid. Kuid võrreldes soojendamise ja jahutamise juures käsitletavate energiahulkadega on selles operatsioonis kasutatav energia oluliselt väikesem ja edaspidi sellele operatsioonile tähelepanu ei pöörata.

4. *Kuumtöötlus – ülessoojendamine, pastöriseerimine/steriliseerimine, jahutamine.* Selles etapis kulub kõige rohkem energiat, eriti produkti ülessoojendamiseks.

Ülessoojendamiseks vajalik energiakulu on ligikaudu $Q = \sum m_i c_i (t_i - t_{alg})$, J, (Holman, 2010, lk 148) kus m_i – i -nda eristatava materjali mass, kg; c_i – i -nda eristatava materjali erisoojusmahtuvus, J/(kg·K); t_i – i -nda eristatava materjali lõpptemperatuur, °C ja t_{alg} – i -nda eristatava materjali algtemperatuur, °C.

Energiakulu arvutuse täpsus sõltub materjalide masside ja alg- ning lõpptemperatuuride õigest määramisest ja erisoojusmahtuvuste õigest valikust. Valime vee erisoojusmahtuvuseks 4,2 kJ/(kg·K), metallkonstruktsioonide erisoojusmahtuvuseks 0,44 kJ/(kg·K) (metalli erisoojusmahtuvus on vee erisoojusmahtuvusest ligi 10 korda väiksem). Arvutustega analüüsimise ligikaudu 2 m³ mahuga konteineriga autoklaavi energiatarvet (teistsuguse mahuga autoklaavi ligikaudsete väärtuste saamiseks tuleb saadud tulemused läbi korrutada suhteteguriga).

Sisemise metallkorpuse siseläbimõõdu 1,3 m korral on sisemise silindrilise ruumi otsa pindala 1,33 m², kahe otsa pindala on kokku 2,66 m², ümbermõõt on 4,1 m ja pikkuse 2,6 m korral on külgpindala 10,6 m². Seega kogupindala on 13,2 m². Kui sisekesta seinapaksus on 1 cm, siis sisekesta maht on 0,132 m³.

Metalli tihedus on 7800 kg/m³ – sellest tulenevalt on 0,132 m³ metalli mass 1029,6 kg. Lisame sellele ülessoojendamise ajal autoklaavis oleva produkti hoidmise

konteineri ja autoklaavis olevate konstruktsioonielementide massi (ligikaudu 100 kg) saame ülessoojendatava metalli massiks ligikaudu 1130 kg. Kui algtemperatuur on 15 °C ja steriliseerimise temperatuur 110 °C, siis metallmaterjali ülessoojendamiseks kulub energiat $Q_{met} = 47\,234$ kJ (13,1 kW·h). Kui materjal on vaja üles soojendada 15 minutiga, siis metallmaterjali üles soojendamiseks vajalik võimsuskomponent on $P_{met} = 52,5$ kW.

Vaatamata kambri gabariitmõõtudele, mahutab autoklaavi asetatava produkti konteinerisse vaid ainult ligikaudu 600 kg töödeldavat produkti. Selle produkti erisoojusmahtuvuseks, kuna ülessoojendatava produkti massi moodustab valdavalt vesi, valime vee erisoojusmahtuvuse $-4,2$ kJ/(kg·K). Vastavalt sellele kulub töödeldava materjali ülessoojendamiseks $Q_{mat} = 239\,400$ kJ (66,5 kW·h) (see energia on ligikaudu 5 korda suurem, kui metallkonstruktsiooni ülessoojendamiseks, kuigi produkti mass on väikesem). Kui produkt tuleb 15 minutiga üles soojendada, siis kujuneb materjali ülessoojendamiseks vajalikuks võimsuse komponendiks $P_{mat} = 266$ kW (samuti 5 korda suurem, kui metallkonstruktsiooni ülessoojendamiseks).

Seega on seadme ülessoojendamiseks kokku vaja energiat ligikaudu $Q_{sum} = Q_{mat} + Q_{met} = 286\,634$ kJ (79,6 kW·h) ja selleks, et ülessoojenemine toimuks 15 minutiga, on vajalik võimsus $P_{sum} = P_{met} + P_{mat} = 318,5$ kW. Autoklaavi ülessoojendamiseks kasutatakse soojuskandjana ülekuumendatud auru temperatuuriga kuni 130 °C.

Vajalik auru kogus, kui entalpia on 2108 kJ/kg, on $m_{aur} = 136$ kg, ehk teisiti öeldes, on autoklaavi üles soojendamiseks vaja kasutada temperatuuril 130 °C juures oleva 136 kg auruks muudetud vees sisalduvat energiat. Selle auru energia antakse edasi nii töödeldavale produktile, kui ka autoklaavi sisemisele kestale, mille tulemusena produkti temperatuur tõuseb 110 °C kraadini ja aur seejuures kondenseerub veeks. Tuleb meele pidada, et protsessi lõpuks tõuseb rõhk autoklaavi sees absoluutse rõhuni 2 bar (0,2 MPa), mille korral 110 °C juures vesi ei aurustu, kuid 130 °C juures on vesi auru kujul. Selles protsessis rõhk autoklaavi sisemuses muutub väliskeskkonna rõhust kuni rõhuni mille juures vee keemistemperatuur on 110 °C. Selles protsessis autoklaavi sisemuses oleva rõhu ja temperatuuri muutumist kirjeldab Clausius-Clapeyron'i võrrand.

Pastöriseerimine/steriliseerimine. Peale temperatuuri tõusmist ettenähtud kõrgusele on seda vajalik hoida ligikaudu püsivana sõltuvalt töödeldava materjali omadustest kogemustega määratud aja kestel, et jõuaks üles soojeneda ka pakendatud produkti sisemus. Vaadeldaval juhul arvestame ajaga 15 minutit. Sellel ajavahemikul energiakulu võrdub ligikaudu soojuskaoga autoklaavi välispinnalt. Reeglite kohaselt ei tohi seadmete välispinna temperatuur olla (see tagatakse sobiva soojusisolatsiooniga) üle 60 °C. Oletame, et välispinna temperatuur on vaid 40 °C (kasutati paremat soojusisolatsiooni), siis on soojuskaod temperatuuride erinevusel 20 K vaadeldava näidis-

autoklaavi välispinnalt vaid 2012 W. Sellel võimsusel on 15 min. steriliseerimisaja kestel soojuskaod vaid 0,503 kW·h. Võrreldes energiakuluga ülessoojendamisele on see väga väike. Seda arvesse võttes lõpetatakse kuuma auru autoklaavi lisamine peale materjali ülessoojenemist. Arvtulemuste baasil saab määrata ka autoklaavi soojusliku kasuteguri – töödeldava materjali ülessoojenemise energia ja kogu kulutatud energia suhte kaudu: see on $66,5/(79,6 + 0,5) = 0,82$, ehk 82%.

Peale pastöriseerimist/steriliseerimist on autoklaav vaja jahutada temperatuurilt 110 °C võimalikult kiiresti vähemalt 50 °C-ni. Selleks saab kasutada puhast külma vett. Kuid esmalt tuleb alandada autoklaavi sisene temperatuur alla 100 °C ehk vaadeldaval juhul 10 K võrra. Selle tulemusena lakkab autoklaav olemast plahvatusohtlik ja võib hakata autoklaavist vett välja laskma. Sisemiste metallkonstruktsioonide 10-kraadisele temperatuuri muutusele vastab (algandmete 1130 kg ja 0,44 kJ/(kg·K) korral) energia 4972 kJ ja produkti koos kondenseerunud auruga mass on 600 + 136 kg. Selle energiamuut 10-kraadise temperatuuri alanemise ja soojusmahtuvuse 4,2 kJ/(kg·K) korral on 30 192 kJ (~8,4 kW·h). Kokku on vaja eemaldada produkti ja metalli temperatuuri alandamiseks 100 °C-ni 30 192 + 4972 = 35 884 kJ (~10 kW·h) energiat. Kui kasutatakse vett temperatuuril 7 °C ja selle vee temperatuur tõuseb jahutamise esimese faasi käigus 100 °C-ni, siis on vaja jahutamiseks $35\,884/(93 \cdot 4,2) = 92$ kg (~92 liitrit) puhast külma kaevuvett. Seega tõusis soojendamiseks-jahutamiseks vajalik veekulu 136 + 92 = 228 liitrit. Peale vee ja produkti temperatuuri alanemist vähemalt 100 °C-ni võib hakata autoklaavist rõhu all olevat vett välja laskma. Energia ratsionaalse kasutamise seisukohast oleks õige see vesi võimalikult kiiresti ümber paigutada soojuslikult isoleeritud mahutisse, mille puhul saaks soojas vees sisalduvat energiat edaspidistes protsessides maksimaalselt ära kasutada. Kuid teisest küljest on produkti kõrge kvaliteedi saamiseks oluline selle kiire jahutus. Kui kasutada eespoolviidatud autoklaavi (Steriflow, 2019), milles produkti temperatuur muutub produkti kogu ulatuses loksutamise tõttu kiiresti ja seega saab kõrgel temperatuuril hoidmise aega lühendada, võib mõni produkt taluda kiiresti vee väljalaskmisest tingitud jahutusaja pikenemist, teine aga mitte. Kui kiire allajahutamine on mõõdapääsmatu, tuleb autoklaavi külma vett lisada kuni temperatuur on retseptiga määratud lõpptasemel. Viimasel juhul autoklaavist väljalastud vett kõrgtemperatuurilistes protsessides ilma täiendava soojendamiseta ei saa kasutada ja kulud vee uuesti ülessoojendamise vajaduse tõttu suurenevad.

5. Produkti autoklaavist välja võtmine, konteinerite ja produkti täiendav töötlemine (puhastamine, pakendamine) – selles protsessis energia ja veekulu on eespool loetletud protsessidest väiksemad ja selle optimeerimine suurt vee- ja energiakulu kokkuhoidu ei anna. Seetõttu tehnoloogia seda etappi ei analüüsita.

6. Autoklaavi puhastamine ja korrastamine ülevii-

miseks hoidmisrežiimi. Seda on vaja teha vaid järjekordse tööperioodi lõppemisel. Selle operatsiooni juures on vaadeldava teema seisukohast oluline vee kasutamise viis. Vee ringlusse võtt võib anda täiendava positiivse efekti.

Tulemused ja arutelu

Iga autoklaavi töö etappide loetelus sisalduv operatsioon sisaldab veel alamoperatsioone ja on seotud energiat tarbivate seadmetega. Energia kokkuhoid tekib energiat tarbivate seadmete võimsuse õige valiku ja kaasaegsemate lahenduste (konstruktsioonid, ajamid, juhtimisautomaatika, tehnoloogia) kasutamine.

Osade loetletud operatsioonide sooritamiseks kasutatakse pikaajaliselt väljakujunenud ja ennast õigustanud tehnoloogiaid, osade korral aga on võimalik valida erinevate tehnoloogiate vahel, mistõttu nii energia kui ka veekulu sama eesmärgiga operatsiooni tegemisel võib olla erinevate talude korral erinev. Operatsioonides kasutatava tehnoloogia iseloomustussuurused sõltuvad töödeldavast produktist, töötlemisviisist (steriliseerimine või pastöriseerimine), temperatuuri muutumise aja-graafikust, mis kõik võivad oluliselt erineda.

Vaadeldavas töös ei analüüsitud mingi konkreetse autoklaavi tööga seosesolevaid iseloomustussuursusi vaid abstraktse autoklaavi abstraktse temperatuurigrافیku alusel tootava autoklaavi tööga seostuvaid iseloomustus-suursusi. Saadud tulemusi on võimalik reaalse autoklaavi tööle üle kanda suhtarvude kasutamiseks.

Autoklaavi töö kuues eristatud etapis kulub kõige rohkem energiat pastöriseeritava/steriliseeritava produkti ülessoojendamiseks ja sellel ajal kandub produktile energia üle kõige intensiivsemalt. Seejuures saab eristada eesmärgi saavutamiseks vajalikke energiakulusid – energiakulu materjali ülessoojendamiseks ja kaasnevaid energiakulusid – autoklaavi metallkonstruktsioonide ülessoojendamiseks ja energiakadudeks, vastavalt 66,5 kW·h ja 13,6 kW·h. Nende numbrite alusel saab määrata autoklaavi töö soojusliku kasutegurit, mis arvutustega saadud tulemuste alusel oli 82%. Samuti sai määrata energia tarbimise intensiivsuse – ülessoojendamise ajal kandus energia autoklaavi üle võimsusega 318,5 kW. See võimsus saavutati tänu 136 kg vee aurustamisel tekkinud ülekuumendatud auru kasutamiseks. Selliste numbrite korral kerkib küsimus energiaallika kohta: missugune peab/saab olla autoklaavile auru tekitamiseks vajalik energiaallikas, mis energia tarbimise graafiku järgi on põhiliselt jõude ja vaid produkti ülessoojendamise ajal lühiajaliselt kasutatust leiab? Ükskõik missuguse olemusega energiavarustuse süsteemile on väga lühiajaliselt suure võimsusega seadmete kasutamine mittevastuvõetav. Autoklaavi korral on võimalik energiavarustussüsteemist energia tarbimist ja selle kasutamist autoklaavi ülessoojendamiseks ajaliselt eraldada kui kasutada seadet, mis suudab energiat koguda kas suure aurukoguse või elektrienergia näol ja vajadusel seda kogutud auru või elektrienergiat produkti soojendamiseks kasutada.

Auru kogumisel võib vee aurustamise seade olla autoklaavi ülessoojendamiseks vajalikust võimsusest oluliselt väiksema võimsusega. Väiksema võimsusega vee aurustamise seadet ei pea energiaga varustama tavapäraselt fossiilkütuse arvel vaid on võimalik kasutada ka biokütust või hoopis päikese- või tuuleenergiat.

Autoklaavi ülessoojendamise võimsusest väiksema võimsusega tuulikute või päikesepaneelide korral on vajalik elektrienergia salvestamine akudesse ja niisugusel korral saab salvestatud energiat kasutada isegi autoklaavi soojendusvõimsusega võrdse võimsusega aurustusseadme küttekehade toitmiseks. Sel puhul auru kogumine ei ole vajalik (näiteks võrdluseks uue elektrilise Volkswagen Golf ID.3 aku mahutavus võib olla sõltuvalt modifikatsioonist kuni 77 kW·h ja elektrimootori võimsus 150 kW (Shahan, 2019)). Volkswagen Golf ID.3 aku mahutavus on samas suurusjärgus autoklaavi ühe töötükli kestel kasutatud energiaga, kuid sellist energiat tarbiva elektrimootori võimsus on siiski autoklaavi võimsusest ligikaudu kaks korda väiksem (150 kW). Juhul kui akusid ei või koormata autoklaavi tööks vajaliku võimsusega küttekehade, siis tuleks kasutada rööbiti mitut akut ja seega täislaaditud akude energiast piisaks isegi mitme töötükli tegemiseks.

Biokütuse, päikese- või tuuleenergia kasutamine vastab CO₂-neutraalse tootmise korraldamise eesmärgile. Maapiirkondades on kirjeldatud infrastruktuuri rajamine kaasajal tehniliselt teostatav.

Järeldused

1. Taludes on autoklaavi kasutamine eelistatud teiste produktide kuumutusviiside ees seoses võimalusega kuumutada erinevaidprodukte ja kasutada erineva konstruktsiooniga ja erinevast materjalist valmistatud pakendeid.

2. Kuigi autoklaaviga seotud tehnoloogia kasutab palju energiat ja esinevad intensiivsed energia ülekandumised, ei tähenda see seda, et kasutatavad energiaallikad peavad olema suure võimsusega. Autoklaavis produkti ülessoojendamiseks vajalikku energiat saab koguda ülekuumutatud auru näol aurukogujasse.

3. Autoklaavi tööd saab korraldada soojuse taaskasutusega, mis võimaldab kasutada väiksema võimsusega energiaallikaid.

4. Auru tekitamiseks saab kasutada nii bio-, tuule-, kui ka päikeseenergiat, millede rakendamisel saab autoklaavi tööd korraldada CO₂-neutraalsena.

Huvide konflikt

Autorid kinnitavad artikliga seotud huvide puudumist.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this paper.

Autorite panus

VP – käsikirja kirjutamine ja lõplik toimetamine;
AG – andmete kogumine, käsikirja toimetamine.

Author contributions

VP – manuscript writing and final editing;

AG – data collection, manuscript editing.

Kasutatud kirjandus

- Grigor, A. 2019. Autoklaavide jahutusprotsessi käigus vabaneva heitsoojuse kasutamise võimalused soojuspumbaga. – Magistritöö. Eesti Maaülikool, Tartu, 84 lk
- Holman, J.P. 2010. Heat Transfer. 10-th ed. – McGraw-Hill, New York, USA, 758 pp.
- ENMAK 2030. Energiamaajanduse arengukava aastani 2030. – https://www.mkm.ee/sites/default/files/enmak_2030.pdf Viimati vaadatud 12/10/2019.
- Euroopa Liidu Teataja C 487/24 28.12.2016, Euroopa Majandus- ja Sotsiaalkomitee arvamus teemal "Pariisi kliimakonverentsi tulemused" <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/PDF/?uri=CELEX:52016IE2544&from=DA> Viimati vaadatud 12/10/2019.
- Steriflow. 2019. "Cascading water Steriflow shaka", <https://www.steriflow.com/en/shaka-autoclave> Viimati vaadatud 12/10/2019
- Shahan, Z. 2019. Volkswagen ID.3 Arrives – Superb Mix Of Quality & Affordability. September 9th, 2019 <https://cleantechnica.com/2019/09/09/volkswagen-id-3-arrives-superb-mix-of-quality-affordability/> Viimati vaadatud 12/10/2019

Case Report: Analysis of energy consumption at processing of agricultural production by using an autoclave on a farm

Veli Palge¹, Andres Grigor²

¹Estonian University of Life Sciences, Institute of Technology, Chair of Energy Application Engineering
Fr. R. Kreutzwaldi 56, 51006 Tartu, Estonia

²Filter Ltd, Ilmatsalu 1, 50412 Tartu, Estonia

Summary

To increase the income of farms in the rural economy, it is beneficial for them to realize the processed product. Compared to concentrating on recycling in an urban factory, processing farm products will disperse the pollution load and create jobs in rural areas. The conversion of farm products into a preserve or semi-finished products involves the heating of raw products. Autoclaves are more suitable than other heating methods/means. The reason is the possibility of using autoclaves for products of different natures and different containers. Today, energy use is associated with CO₂ emissions and global warming. Therefore, according to modern beliefs, the use of autoclaves also needs to find ways of reducing the amount of energy or even of using renewable energy. The preparation of raw materials for autoclave processing requires drinking water-quality water, which, once the technological process has been completed, is discharged to a sewage treatment plant in a city-based manufacturing plant and is then diverted to treatment plants. For example, a

large city-based company "wastes more than 9,000 GJ of waste heat per year" (Grigor, 2019, p. 8) and cooling water was used "on average 326 m³ per day" (Grigor, 2019, p. 15) and was discharged into sewers. In farm conditions, the question arises: to what extent do the soil and plant parts of the product taken from the field or berry bushes contaminate nature when they are reintroduced into the wild in sparsely populated Estonia, especially when the solid waste is composted and the washing water is sent to a sediment pond or a biological treatment plant. Autoclave performance values are determined using the principles of thermal engineering described in Holman, 2010, HEAT TRANSFER (J.P. Holman, 2010).

This paper analyzes the work-related parameters of an autoclave with a volume of about 2 m³. An autoclave of this size holds about 600 kg of product in small packages, the product to be treated is heated at 130 °C for 15 minutes to about 110 °C at 2 bara (0.2 Mpa) and held at this temperature for 15 minutes. After that, the product is cooled to 50 °C with cold water and taken out of the autoclave and, after a short cooling, is packaged for marketing.

Autoclave technology includes the following operations:

1. *Preparation of the material to be processed for placing in the autoclave container:* washing of the raw material, cleaning, tare of the prepared product. From the perspective of the issue under consideration, the most important question at this stage of the technological process is the use of clean water: either pure water is used only once or water is purified and reused after use. Although a large amount of water is used at this stage of the technological process, the energy consumption of this operation in the entire technological process is a small part of the overall process energy consumption, as the water is only heated to 15 °C. Calculations include 1 liter of water at 15 °C per 1 kg of product. If the water temperature of the well is 7 °C, the water must be heated to a minimum of 15 °C to ensure the health of the workers. This consumes 20,160 kJ or 5.6 kW·h per 600 kg of product.

2. *Preparation of the autoclave and container(s) for product placement:* Again, clean water technology is important. For an autoclave with selected parameters and water consumption of 0.05 m³, only 0.56 kW·h of energy is needed to heat 7 °C of well water to 15 °C.

3. *Placing the Product in Containers and Loading the Product Container Autoclave:* No water is used at this stage and only the amount of energy used in this operation should be considered. The energy used in this operation is significantly reduced and this operation will be ignored.

4. *Heat treatment* – heating, pasteurization/sterilization, cooling. At this stage, most energy is consumed, especially to heat the product.

The energy required to heat up is divided into two.

With a starting temperature of 15 °C and a sterilization temperature of 110 °C, the energy required to heat the metal material is $Q_{met} = 47,234$ kJ (13.1 kW·h).

If the material needs to be warmed up in 15 minutes, the power component needed to warm up the metal material is $P_{met} = 52.5$ kW.

Accordingly, it takes $Q_{mat} = 239,400$ kJ (66.5 kW·h) to heat the material to be processed (this energy is approximately 5 times higher than heating the metal structure, although the weight of the product is lower). If the product is to be warmed up in 15 minutes, the power component needed to heat the material is $P_{mat} = 266$ kW (also 5 times higher than that for the metal structure).

Thus, the total energy required to preheat the device is approximately $Q_{sum} = Q_{mat} + Q_{met} = 286,634$ kJ (79.6 kW·h), and for the warm-up to occur in 15 minutes, the required power is $P_{sum} = P_{met} + P_{mat} = 318.5$ kW. The autoclave is heated with superheated steam up to 130 °C as the heat carrier.

The required amount of steam for enthalpy of 2108 kJ/kg is $m_{steam} = 136$ kg, in other words, to heat the autoclave, use the energy contained in 136 kg of vaporized water at 130 °C.

Pasteurization/sterilization. After the temperature has risen to the desired height, it is necessary to keep it approximately constant, depending on the nature of the material being processed, over a period time determined by experience, so that the inside of the packaged product can also warm up. In this case, we count the time to 15 minutes. As a rule, the temperature of the external surface of the equipment (guaranteed by the use of suitable thermal insulation) must not exceed 60 °C. Assume that the outside temperature is only 40 °C (better thermal insulation was used), then the heat loss at the temperature difference of 20 K from the exterior surface of the sample autoclave in question is only 2012 W. At this power the heat loss during 15 min. during the sterilization period is only 0.503 kW·h.

From the numerical results, it is also possible to determine the autoclave's thermal efficiency - the ratio of the heat-up energy of the material being processed to the total energy consumed: it is $66.5/(79.6 + 0.5) = 0.82$, or 82%.

After pasteurisation/sterilization, the autoclave must be cooled from 110 °C to at least 50 °C as soon as possible. However, the temperature inside the autoclave must first be lowered to below 100 °C, in this case by 10 K. The 10-degree temperature change of the internal metal structures (at 1130 kg and 0.44 kJ/(kg·K) of the input data) corresponds to an energy of 4972 kJ and a mass of condensed steam of 600 + 136 kg. It has an energy change of 30,192 kJ (~8.4 kW·h) for a 10-degree drop in temperature and the heat capacity of 4.2 kJ/(kg·K). In total, it is necessary to remove the energy of the product and metal to 100 °C to $30,192 + 4972 = 35,884$ kJ (~10 kW·h). If the water at 7 °C is used and its temperature rises to 100 °C, $35,884/(93 \cdot 4.2) = 92$ kg (~92 liters) of pure cold well water is required for cooling. Thus the water consumption for heating and cooling increased to $136 + 92 = 228$ liters. After the temperature of the water and the product has dropped to at least 100 °C,

pressurized water may be drained from the autoclave. For the rational use of energy, it would be right to transfer this water as quickly as possible to a thermally insulated tank, which would allow maximum use of the energy contained in the hot water in future processes. On the other hand, rapid cooling is essential to the high quality of the product.

If rapid quenching is unavoidable, add cold water to the autoclave until the temperature is at the final level specified by the recipe. In the latter case, the water discharged from the autoclave cannot be used in high-temperature processes without additional heating and the cost increases due to the need to reheat the water.

5. *Removal of product from the autoclave, further processing of containers and product* (cleaning, packaging). In this process, energy and water consumption are lower than those listed above and optimization does not result in significant water and energy savings. Therefore, technology is not analyzed at this stage.

6. *Autoclave cleaning and rearrangement to switch to hold mode*. You only need to do this at the end of another working period. In this operation, how water is used is important to the subject under consideration. Water recycling can have an additional positive effect.

Results and discussion

In this work, the characteristic values associated with the work of a particular autoclave were not analyzed, but the characteristic values associated with the work of an autoclave operating based on an abstract autoclave's abstract temperature graph. The results obtained can be transferred to the work of a real autoclave using ratios. In the six distinct stages of the autoclave's work, it takes the most energy to warm up the product to be pasteurized/sterilized, during which time the energy is transferred to the product most intensively. There is a distinction between the amount of energy required to achieve the target – the energy used to heat the material and the associated amounts of energy – to heat the autoclave metal structures and the energy losses of 66.5 kW·h and 13.6 kW·h respectively. These numbers can be used to determine the thermal efficiency of the autoclave's work, which was 82% based on the results. The intensity of energy consumption could also be determined - during heating, the energy was transferred to the autoclave with a power of 318.5 kW.

This capacity was achieved through the use of superheated steam generated by evaporating 136 kg of water.

With such numbers, the question arises as to the source of energy: what must / can be the source of energy that is essentially idle and only briefly used during the warm-up of the occasion? An autoclave requires the use of a device capable of collecting a large amount of steam and, if necessary, using it at some point. Thus, the power of the water vaporization device may be substantially less than the power required to warm the autoclave.

Smaller water vaporizers do not usually need to be fossil fuels, but they can also use biofuels or solar or

wind power. It is possible to use electricity from lower power wind turbines or solar panels. The use of biofuels, solar or wind power is in line with the objective of carbon-neutral production. In rural areas, such infrastructure is now technically feasible.

Conclusions

1. On farms, the autoclave is preferable to other products because of the ability to heat different products and packaging of different designs and materials.
2. Although the technology involved in the autoclave

is energy-intensive and there are intensive energy transfers, this does not mean that the power sources used must be high in power. The energy needed to heat the product in the autoclave can be collected in the form of superheated steam in a steam collector.

3. Autoclave work can be organized by heat recovery, which allows the use of lower power sources.

4. The steam can be produced using bio, wind or solar energy, which will make the work of the autoclave carbon neutral.