

Demonstration Projects

Call for Ideas to Boost the Competitiveness of the Estonian Manufacturing Industry

Final Report

Please fill in the Final Report in Estonian or English
The content of the Final Report is published also in [AIRE GitHub](#)
To be filled by the Lead of the Development Team

Demonstration Project Title

Tehisintellektil põhineva protsessijuhtimise testimine teraviljakuivati
automatiseerimiseks
/ Testing an AI based process control for grain dryer automation

Company

Company Representative Name (First name, Surname)	Heilo Altin
Company name	IntelliDry OÜ

Development Team

Development Team Lead Name (First name, Surname)	Veiko Vunder
--	--------------

Objectives of the Demonstration Project

Demoprojekti eesmärk oli ehitada tehisintellektil (TI-I) põhinev viljakuivatusprotsessi mudeli lahendus (AI based process control), mida saab integreerida olemasolevate teraviljakuivatite külge. Kuivateid on täna kahte tüüpi - portsjonkuivatid ja pidevkuivatid. IntelliDry eesmärk on tekitada esimeses etapis TI-I põhinev kuivatuse juhtimine portsjonkuivatitele sõltumata sellest, kas nad on täna kaugelt hallatavad või mitte. Kaughalduse pakkumise võimekus on täna meil olemas ning paljud uuemad kuivatid on samuti kaugelt hallatavad aga neid on siiski veel vähe. Demoprojektina valmib mudel, mis suudab sõltuvalt kuivati tüübist ning teistest sisendandmetest teha parima küttegraafiku soovitus. Soovitus on optimaalseim nii aja- kui energiakulu mõttes.

Activities and results of the Demonstration Project

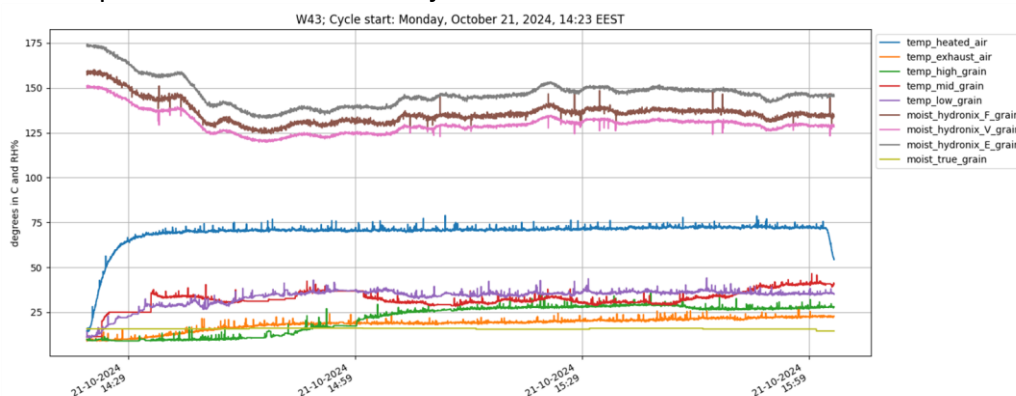
Challenge addressed (i.e. whether and how the initial challenge was changed during the project, for which investment the demonstration project was provided)

Peamine väljakutse on leida AI-põhine mudel, mis kirjeldaks vilja kuivamise protsessi. Demoprojekti käigus uuriti, milliseid andmeid oleks võimalik kasutada mudeli leidmiseks. Demokuivatist oli saada temperatuuriandmed siseneva ning väljuva õhu baasil ning kuivatussektsoonides olevate temperatuuride kohta. Mudeli olemasolu aitaks ennustada kuivamise ning operaatori aega ning vältida ülekuivatamist. Esialgu välja toodud idee hakata kontrollima kuivatusprotsessi läbi automaatsüsteemi, ei rakendatud. Arenduse ressurss suunati andmete kogumisse, ettevalmistusse ning mudelite katsetamisse. Kuivati enda põleti opereerimine ei olnud mõistlik, see oleks tähendanud viinud tähelepanu kõrvale. Ideena on kuivati automaatse juhtimise võimekus alles, kuid selles projektis keskenduti mudeli jaoks vajalike andmete leidmisele ning mudeli enda arendusele.

Activities implemented and results achieved

Projekt jagati järgmistesse etappidesse:

1. 27 m³ kargkuivati tööprotsessi kaardistamine. Selle etapi käigus analüüsiti õhu ning massi liikumist ning valiti välja asukohad andurite paigutamiseks.
2. Töötati välja riist- ja tarkvara, mis on aluseks andmete kogumiseks. Riistvaraks on kilp, kus asub Raspberry Pi arvuti koos andurite- ning releemooduliga. Kilbiga on ühendatud temperatuuri- ja niiskusandurid. Kilp on ühendatud kuivati enda kontrollkilbis olevate kontaktoritega.
3. Loodud süsteem paigaldati Mällona Mõis kuivatisse ning seda kasutati läbi terve 2023 kuivatushooaja. Süsteem salvestas kuivatustsüklielt andmeid ning võimaldas kuivatit operaatoritel oma mobiilist juhtida. Lisaks koguti suurema sagedusega käsimõõtmise teel niiskusandmeid tatra kuivatamise ajal.
4. Hooajale järgnes andmete analüüs ning erinevate mudelite katsetamine. Leiti, et füüsikaline mudel on võimeline kuivamisprotsessi temperatuuriandmete pealt järgima aga selle parameetrite leidmiseks on vaja kasutada AI-d. Lisaks ei ole füüsikaline mudel võimeline ise ümber õppima ning ennustama ette kuivatusprotsessi tulemust ühes ajaühikus.



Näide ühe kuivatusprotsessi andmetest.

Data sources (which data was used for technological solution)

Tehnoloogiline lahendus on kuivati külge integreeritav andurite komplekt, mis aitab kaardistada kuivatusprotsessi käigus toimuvaid temperatuuride ning õhuniiskuste muutusi. Need andmed on aluseks kuivatusprotsessi mudeli arendusel, mis jätkub ka peale seda demoprojekti. Lisaks mõõtsime käsitsi tera- ning kaunviljade niiskust läbi kuivamisprotsessi. Kokku kogutakse demokuivatis järgmiseid andmeid:

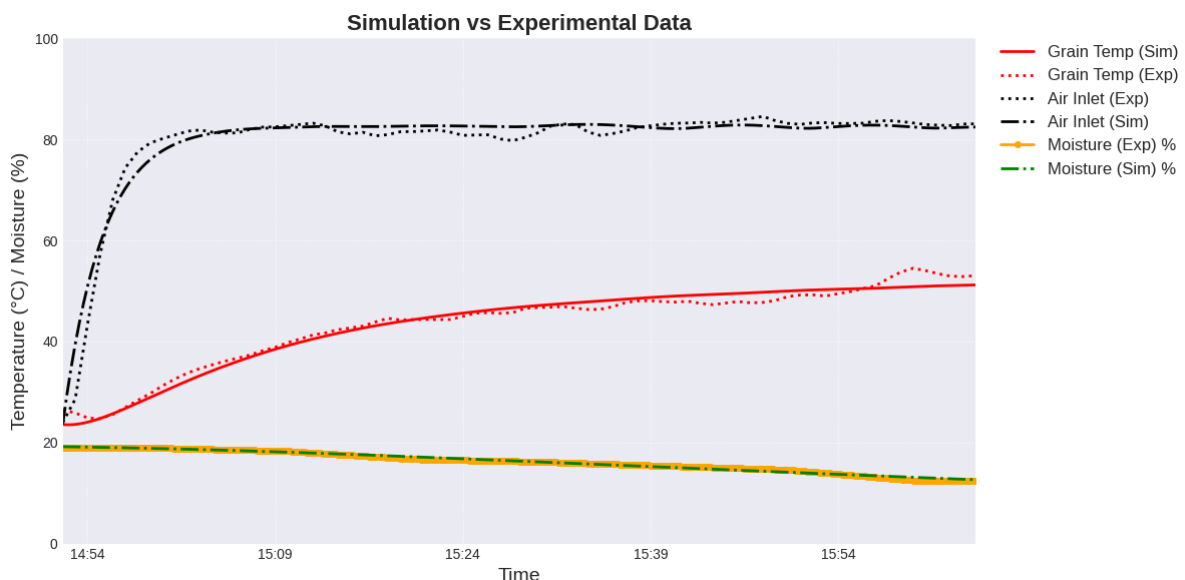
- Kuivatisse siseneva õhu temperatuur
- Ahju siseneva õhu temperatuur
- Kuivatist väljuva õhu temperatuur
- Temperatuur kuivatussektsooni lõpus
- Temperatuur kuivatussektsooni keskel
- Temperatuur kuivatussektsooni alguses
- Siseneva õhu suhteline niiskus
- Väljuva õhu suhteline niiskus

Mudeli arendamisel ja andmete analüüsimisel tugineti eelnevalt otsitud kirjandusele, millest olulisemat sisendit saadi järgmistest allikatest:

- Myhan, R.; Markowski, M. Generalized Mathematical Model of the Grain Drying Process. *Processes* 2022, 10, 2749.
- Bala, Bilash Kanti. *Drying and storage of cereal grains*. John Wiley & Sons, 2016.
- Siqueira, Valdiney Cambuy, et al. "Drying kinetics and effective diffusion of buckwheat grains." *Ciência e Agrotecnologia* 44 (2020): e011320.
- Basunia, M. A., and T. Abe. "Adsorption isotherms of barley at low and high temperatures." *Journal of food engineering* 66.1 (2005): 129-136.
- PAMI, Equilibrium Moisture Content Charts for Grain Storage Management (<https://pami.ca/resource-library/equilibrium-moisture-content-charts-grain-storage/>)

Description and justification of used AI technology

Käesolevas demoprojektis töötati välja füüsikaline mudel, mis võtab arvesse kuivatusprotsessi olulisemaid komponente nagu soojusülekanne sisenevalt õhult teraviljale kuivatussektsoonis, soojuskadu reservuaarist ümbritsevasse keskkonda, kuivatatava vilja massi, jne. Vilja niiskussisalduse leidmiseks on kasutatud õhukese kihi kuivatusmudeli diferentsiaalkuju, mille kohaselt teravilja niiskussisalduse muutus on proportsionaalselt seotud teravilja hetkeniiskuse ja tasakaalniiskuse (*equilibrium moisture content*) vahega. Tasakaalniiskuse sõltub omakorda vilja temperatuurist ja antud seosed ning matemaatilised lähendid on kirjanduses põhjalikult analüüsitud. Kuna kogu kuivatusmudeli kirjeldamiseks väljatöötatud võrrandite süsteemi on analüütiliselt väga keeruline lahendada, kasutati mudeli arvutamiseks numbrilisi meetodeid (sh Runge – Kutta integreerimist) ning parameetrite optimeerimiseks DE (Differential Evolution) geneetilist optimeerimisalgoritmi mudeli parameetrite tuvastamiseks kuivatist kogutud andmete põhjal. Demoprojekti käigus proovisime rakendada ka aegridadel põhinevaid masinõppe meetodeid, et ennustada temperatuuri muutuste põhjal niiskuse muutusi, kuid jõudsime kiirelt järeldusele, et selleks tarvilik andmestik peab olema märkimisväärselt suurem kui oleme võimelised antud projekti raames koguma. Olgugi, et väljatöötatud mudel põhineb kuivatis toimuvatel füüsikalistel protsessidel, on mudelil sisseehitatud aruka süsteemi tunnused ja ümberõppimise võime, kui kuivatustsüklite lisandumisel mudeli parameetreid uuesti optimeerida.

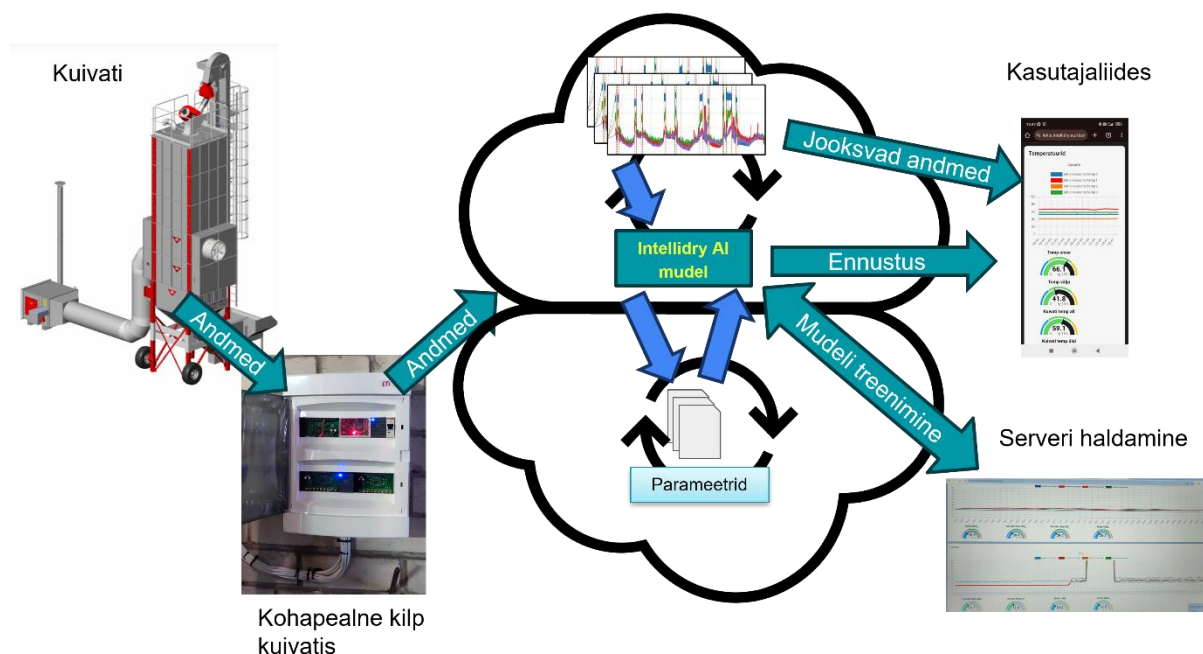


Simulated model optimized for experimentally recorded oats drying cycle

Results of testing and validating of the technological solution

Tera- ning kaunvilja kuivatusprotsessi kirjeldava mudeli täpne toimimine sõltub väga suurel määral alusandmetest, mida demokuivati kuivatusperioodi ajal ei kogutud piisavalt. Kuivatusperioodi ajal kogutud andmed olid aluseks mudeli arendamisel. Talvel ühtegi kuivatust ei toimunud, leitud seoseid katsetati olemasolevate andmekogumite peal. Leiti tugev seos teravilja temperatuuri ning niiskusesisalduse vahel. Seega on võimalik kirjeldada kuivuse protsentuaalset näitu temperatuuri kaudu. Ennustamiseks on vaja võtta aluseks temperatuuri käitumine, mis omakorda sõltub paljudest teguritest, mida demokuivati mõõtmisel ei võetud arvesse. Need on läbivoolukiirus, õhumassi liikumise kiirus ning reservuaari maht. Esimest kahte saab operaator muuta, mis tähendab muutusi ka mudeli parameetrites. Läbivoolukiiruse automaatne tuvastamine läbi temperatuuriandmete saab olema mudeli üks ülesanne, millele keskendutakse järgmises demoprojektis.

Kuivatusperioodi ajal jälgisid operaatorid demokuivatis alumist vilja temperatuuri, mille käitumine aitas hinnata vilja kuivaks saamise ajahetke. Sõltuvalt vilja tüübist oli võimalik leida temperatuuri abil ajahetk, kui kuivatis oli vaja teha niiskuse mõõtmine ning hinnata portsjoni valmidust. Temperatuurist sõltuv jahutamisprotsess sai süsteemi juurde implementeeritud ning paaril korral katsetatud. Kontrollsüsteem alustas jahutust operaatori ette seatud viljatemperatuuri saavutamisel. Sellega välditi juba üleliigset energia- ning amortisatsioonikulu.



Technical architecture of the technological solution (presented graphically, where can also be seen how the technical solution integrates with the existing system)

Potential areas of use of technical solution

Tehnilise lahenduse kasutuskohad on kõik portsjonkuivatid, sõltumata oma vanusest. Uuematel on juba külge integreeritud temperatuuri- ja niiskusandurid ning kuivati on pandud kaaludele. Kuid need ei taga ilma käsimõõtmiseta lõppeesmärki ning neid andmeid ei osata täna kuidagi ära kasutada. Teraviljakuivatuse optimeerimine on väljakutse, mille peale pole paljud farmerid mõelnud. Küll on see aga suure potentsiaaliga energiasäästmise võimalus.

Projekti käigus loodud tehnoloogiline lahendus ei sõltu kuivati mudelist ega tootjast. Tarkvaraline mudel saab olema võimaline õppima mõnede kuivatustsüklite pealt kuivati

Kasutajaliides eksisteerib nii serveri, kui kliendi poolel. Operaatori kasutajaliides läbis täiendava arenduse. Operaatoril on võimalik jälgida kuivatis olevaid temperatuure ning kontrollida elektrimootorite tööd. Mootorite olekud on kasutajaliideses näha. Näiteks põleti rikkest käivitamisel annab märku nii mootori olek, kui siseneva õhu temperatuur. Andurite temperatuurid on kujutatud ka graafiliselt, et kuni kuuetunnised tsüklid oleks tervenisti näha. Operaatoril on võimalus sättida ühe temperatuurianduri järgi päästikväärtus, mille järgi pannakse portsjon automaatselt jahtuma. Demokuivatis leiti, et kaera niiskustase on soovitud piirkonnas, kui kuivati alumise temperatuurianduri näit ligineb 55°C. Tehnoloogiline lahendus oli võimaline selle punkti saavutades panema portsjoni ise jahtuma ning teavitas sellest operaatorit.

Esimeses projektis saavutatud tulemused ja järeldused andsid mõista, et parema mudeli saamiseks on vaja rohkem andmeid, millega mudelit treenida. Rohkem andmeid on vaja rohkematelt kuivatitelt. Lisaks polnud lõpuni ka selge, milline mudel töötaks kõige paremini. Sellepärast otsustati taotleda veelkord AIRE abiga AI mudeli edasiarendust ning PRIA abiga varustati rohkem kuivateid (kümme) anduritega, mille abil koguda andmeid 2024 kuivatushooajal. Hetkel käib arendustöö masinõppe suunal ning lisaks töötab ettevõtte hinnastamis- ning ärimudeliga, et tulla Eesti põllumeeste jaoks teenusega turule juba 2025. aasta kevadel.

Lessons learned

i.e. assessment whether the technological solution actually solved the initial challenge

Tehnoloogiline lahendus täitis kindlasti ühe eesmärgidest, milleks on kuivati mobiilsest seadmest jälgimine ning opereerimine. Kogutud andmed viitavad aga paljudele küsimustele, millele vastamiseks on vaja andmeid teistest kuivatitest. See annab võimaluse võrrelda vilja kuivamise protsessi kuivatite vahel ning nii saab tuua mudelisse parameetreid juurde või neid vähemaks võtta. Ühe õppetunnina võib välja tuua olukorra, kus mudeli leidmiseks ja treenimiseks on vaja kindlasti rohkem füüsilisi tunnuseid mõõta, kui alguses vajalik tundub. Kuigi vilja kuivamine ei tundu esmaanalüüsi põhjal keeruline protsess, siis pigem tuleb mudeli arendusel kasuks mõõta rohkem tunnuseid rohkematest kohtadest. Eesmärk on leida lõpuks minimaalne riistavara, mis aitaks mudelil ennustuse täpselt viia.

Projekti lühikirjeldus (AIRE kodulehele, eesti keeles)

Projekti pealkiri, millist väljakutset lahendati, projekti eesmärk, millist tehisintellekti tehnoloogiat valideeriti, projekti tegevused ja tulemused, kuni 10 lauset

Targa kuivati lahendus on projekt, mille käigus digitaliseeriti 25m³ portsjonkuivati andurite ja pilveserveriga ühenduses oleva kontrollkilbiga. Eesmärk oli tuua informatsioon ja kontroll mobiilsesse seadmesse ning saada andmed teravilja kuivamisprotsessi kirjeldava mudeli loomiseks. Targa kuivati lahendus hõlmab endas nii siseneva- kui väljuva õhuvoolu temperatuuri- kui niiskuse mõõtmist ja kuivatis vilja sees toimuvate temperatuuride mõõtmist. Lõplik eesmärk on andmete põhjal ennustada portsjoni kuivaks saamise hetke ning anda soovitusi kuivatusakna valikuks, kui kuivati koormus seda võimaldab. Kuivatis olev väike arvuti laadib serverisse anduritelt saadud andmeid ning serveri tarkvara on saadud andmete põhjal võimeline operaatori mobiilsele seadmele andma jooksvat kuivaks saamise ennustust.



Project description (to be published on AIRE webpage, in English)

Project title, what challenge was addressed, aim of the project, what AI technology was validated, project activities and results achieved, max 10 sentences

The Smart Dryer solution is a project in which a 25m³ batch dryer was digitalized with sensors and a control panel connected to a cloud server. The goal was to bring information and control to a mobile device and gather data for creating a model that describes the grain drying process. The Smart Dryer solution includes measuring the temperature and humidity of both incoming and outgoing airflow, as well as temperature measurements within the grain in the dryer. The ultimate aim is to predict when a batch will be fully dried based on the data and provide recommendations for selecting optimal drying windows when the dryer load allows it. A small computer in the dryer uploads sensor readings to the server, where software processes the data and provides a real-time drying prediction to the operator's mobile device.