



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Joonatan Sohkanen

Tyhjiökeitin ja sen ohjaus PID-säätimellä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

12.10.2020

Tekijä Otsikko	Joonatan Sohkanen Tyhjiökeitin ja sen ohjaus PID-säätimellä
Sivumäärä Aika	26 sivua 12.10.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	elektroniikka
Ohjaajat	lehtori Anssi Ikonen
<p>Opinäytetyön tavoitteena oli rakentaa sous vide -keitin eli tyhjiökeitin, jonka lämpötilan säätäminen toteutettiin PID-säätimellä. Työssä käydään läpi ruoankypsennyksen historiaa, biologiaa ja riskejä. Työ keskittyy pääpainoltaan kuitenkin PID-säätimen teoriaan ja erityisesti sen kokeelliseen virittämiseen. Työssä annetaan tarvittavat tiedot sous vide -keittimen rakennukseen ja PID-säätimen virittämiseen.</p> <p>Sous vide -keitin on komponenteiltaan yksinkertainen laite. Tarvitaan vain lämpövastus, lämpöanturi ja ohjainyksikkö, josta voi asettaa halutun lämpötilan. Jos keittimen lämpötilan säädöstä haluaa tehdä tarkan, niin tarvitaan viritetty säädin, kuten PID-säädin. PID-säätimen virittämiseen tarvitaan siihen soveltuva ohjelma, hieman perusteorian tuntemusta ja aikaa virittämiseen.</p> <p>Opinnäytetyön lopputuloksena syntyi toimiva sous vide -keitin, joka kykenee toimimaan tarvittavalla tarkkuudella. Työn aikaa vievin osuus oli keittimen PID-säätimen virittäminen. Vaikka virittäminen itsessään oli suhteellisen helppoa, aikaa kului jokaiseen testiin huomattavasti. Virittämisen yhteydessä opittiin PID-säätimen teorian lisäksi paljon käytännön asioita, jotka tulevaisuudessa tulevat nopeuttamaan vitysprosessia, jos sous vide -keitintä kehitetään jatkossa.</p>	
Avainsanat	PID-säädin, Sous vide, virittäminen

Author Title	Joonatan Sohkanen Sous Vide Device and Tuning a PID Controller
Number of Pages Date	26 pages 12 October 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Electronics
Instructors	Anssi Ikonen, Senior Lecturer
<p>A sous vide cooker is a device for cooking ingredients in a water bath with precise temperatures. The name sous vide is French and means under vacuum. As the name suggests ingredients are vacuum sealed and then put underwater in a certain temperature and time.</p> <p>The objective for the thesis work was to build a sous vide cooker using a PID controller to regulate the temperature.</p> <p>The first chapter of the thesis includes the history, biology and risks of sous vide cooking as it is important to understand the requirements for such a device. The main focus of the thesis is on the technical side of the cooker with the emphasis being on tuning the PID controller.</p> <p>Sous vide cooker is a fairly simple device. Components required for this project included a heating coil, temperature sensor and a controller. To have an accurate device the controller needed to be programmed and tuned for this particular case. In order to tune in the PID controller one needs to have a knowledge of the tuning rules, a tuning software and adequate time.</p> <p>As result of this project, a working sous vide machine was achieved. The wanted precision of ± 0.5 °C was accomplished after hours of tuning and trying. As a part of constructing and tuning the device many practical ways to improve the device were discovered. This study gives the basic information to construct and tune a similar device.</p>	
Keywords	PID controller, Sous vide, tuning

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Sous vide -kypsennys	2
2.1	Sous vide -kypsennyksen historia	2
2.2	Sous vide ja turvallisuus	3
	Muovin riskit lämpimissä olosuhteissa	4
2.3	Tyhjiökypsennyksen toiminta käytännössä	5
3	PID-säädin	8
3.1	PID-säätimistä yleisesti	8
3.2	PID-säätimen osat	10
	Suhdeosa	10
	Integroiva osa	10
	Derivoiva osa	11
	Osat yhdistettynä	11
3.3	PID-säätimen viritysmetodit	12
	Ziegler-Nichols-metodit ja niiden variaatiot	13
	PID-säätimen ohjelmallinen viritys	15
4	Sous vide -keittimen toteutus	18
4.1	PID-säätimen ohjelmointi	20
4.2	PID-säätimen virittäminen	21
4.3	Kehitysehdotuksia	24
5	Yhteenveto	25
	Lähteet	27

1 Johdanto

Ruoka on paitsi yksi elämän perusedellytyksiä, myös kulttuurillisesti tärkeä asia. Aika, kulttuuri ja ympäristö ovat muovanneet vuosisatojen ajan erilaisia ruokakulttuureita ja kypsentämismenetelmiä. Vaikka tuli on yhä tärkein ruuan kypsentämismenetelmä maailmanlaajuisesti, on se saanut viimeisen vuosisadan aikana itselleen monikäyttöisen kilpailijan; sähkö on korvannut tulen erityisesti nopeasti kehittyvissä maissa. [15.] Sähkön avulla saadaankin tuotettua lämpöä tehokkaasti ja helposti. Viime vuosikymmenien aikana myös sähkölaitteiden tarkkuus on saatu erittäin hyväksi, jopa kotikeittiöissä. Sähkö tulee tuskin koskaan korvaamaan tulta täysin ruuanlaitossa, mutta se antaa enemmän mahdollisuuksia ruuanlaittoon.

Tämä opinnäytetyö tutkii tarkan matalalämpötilavesihauteen eli sous vide -keittimen teoriaa ja käytännön toteutusta. Sous vide tulee ranskankielestä ja tarkoittaa suoraan suomennettuna ”tyhjiössä”. Tyhjiökypsennys on ollut viimeisen kymmenen vuoden ajan vahvassa nousussa ja monet alkoivat valmistamaan omia keittämiä niiden korkean hinnan ja vaikean saatavuuden vuoksi. Nykyään ammattitasoinen keitin maksaa 500–1000€, mutta kotikäyttöön soveltuvan keittimen saa jo alle sadalla eurolla. Tähän työhön käytettyihin tarvikkeisiin kului noin 80 euroa, joten mittavaa säästöä ei syntynyt.

Työssä käytetään PID- säädintä lämpötilan hallintaan. PID- säädin on käytetyin säädin teollisuudessa ja toimii erinomaisesti tähän sovellukseen. Työ käy läpi PID- säätimen yleistä teoriaa ja eri viritysmetodeja, sekä esittelee yhden tavan käytännön viritykseen verkkosovelluksella. Viritys itsessään oli projektin aikaa vievin osuus. Jos käyttäjälle riittää huonompi tarkkuus, niin projekti olisi nopeasti valmis. Opinnäytetyössä annetaan tarvittavat tiedot oman keittimen rakentamiseen ja kehitysehdotuksia tämän projektin keittimeen liittyen.

Vaikka kyseessä on teknisen alan päättötyö, niin siinä esitellään myös sous vide -kypsennyksen historiaa, turvallisuutta ja toimintaa käytännössä. Onhan tärkeää ymmärtää, mitä keittimeltä odotetaan ja vaaditaan, ennen kuin sen toteuttaa käytännössä.

2 Sous vide -kypsennys

2.1 Sous vide -kypsennyksen historia

Matalalämpötilakypsennyksen esi-isänä pidetään yleisesti Benjamin Thompsonia joka vuonna 1799 kokeili kypsentää lampaanpaistia laitteessa, jonka hän oli valmistanut perunoiden kuivattamista varten. Hän jätti lampaan laitteeseen kolmeksi tunniksi, kunnes luovutti lopputuloksen ollessaan pettymys. Hän antoi lampaanpaistin kotiapulaisillensa, jotka jättivät sen laitteeseen koko yöksi, ajatellen kypsentävänsä sen seuraavana päivänä. Kun he seuraavana päivänä ottivat lampaanpaistin laitteesta, he huomasivat sen olevan täysin kypsynyt ja erittäin maukas. [3; 2.]

Ensimmäiset sirkulaattorit eli tarkasti säädettävissä olevat vesihautteet, eivät tulleet myyntiin ruuanlaittoa varten, vaan tieteellisiä laboratorioita varten. Tarkasti säädettävissä olevat vesihautteet olivat erinomaisia erilaisten tieteellisten kokeiden tekemisessä. Monissa tapauksissa sirkulaattorit syrjäyttivät bunseninpolttimet. [1.]

Vasta 1960-luvulla huomattiin sirkulaattoreiden mahdollisuus ruuanlaitossa. Silloin ruuanlaittoon soveltuva muovi alkoi tulla yleisemmäksi ja tämä mahdollisti uppokypsennyksen muovipussissa. Aluksi huomattiin, että sulkemalla ruoka vakuumpussiin ja kypsentämällä se vesihautteessa ruuan säilyvyys piteni moninkertaisesti normaaliin kypsennykseen verrattuna. Tätä tekniikkaa alkoivat käyttää monet sairaalat, laitokset ja kaupalliset suurkeittiöt. [2.]

Vasta vuonna 1974 lämpöhaudekypsennys löysi tiensä ravintolamaailmaan, kun Pierre Troisgros halusi kehittää uuden tavan kypsentää hanhen maksaa (foie gras). Hän pyysi kokkiystävänsä Georges Pralusia auttamaan häntä kehitystyössä. He huomasivat, että kun hanhen maksaa kypsentää matalalla lämpötilalla vesihautteessa se menetti vain noin 5 % rasvaa verrattuna pannukypsennykseen, jossa se menetti noin 50 % rasvasta. Tämä löytö oli mullistava ja Georges Pralus alkoikin opettaa lämpöhaudetekniikkaa omassa kokkikoulussaan [2.]

Samoihin aikoihin tiedemies ja kokki Bruno Goussault työskenteli amerikkalaiselle ruokayritykselle ja huomasi että lihat, jotka kypsennettiin matalassa lämpötilassa

lämpöhaude-metodilla, säilyttivät enemmän nestettä sisällään, olivat maukkaampia, omasivat paremman suutuntuman ja kypsyivät tasaisemmin muihin kypsennysmetodeihin verrattuna. [5.]

Bruno Goussaultia ja Georges Pralusia pidetään sous videen kehittäjinä, vaikka he eivät tuohon aikaan työskennelleet vielä yhdessä. Goussaultia pidetään sous videen 'tiedemiehenä' ja Pralusia 'artistina'. Vuonna 1980 he alkoivat työskennellä yhdessä, jotta saisivat metodilleen Ranskan ruokaviraston hyväksynnän. Ruokavirasto standardisoi prosessin ja tämä mahdollisti laajemman ammattilaiskäytön. Metodi ei kuitenkaan yleistynyt, vaan pysyi harvojen kokkien salaisuutena. Vasta vuonna 2008 Thomas Kellerin julkaisema kirja *Under Pressure: Cooking Sous Vide* sai todella julkisuutta tekniikalle. [4.] Toki ennen tätä monet finedine-kokit käyttivät tekniikkaa, mutta todella yleistä se ei ollut.

2.2 Sous vide ja turvallisuus

Haitalliset bakteerit ovat suurin riskitekijä sous vide- kypsennyksessä. Nykyään tunnetaan tuhansia erilaisia patogeenejä, joista on tehty paljon tutkimuksia ja näiden pohjalta päätelty turvalliset kypsennyslämpötilat. Tämä on osittain johtanut bakteerien pelkoon ja monien tapauksessa bakteereihin negatiiviseen suhtautumiseen ja ylivarovaisuuteen. Tämä pelko ei ole turha, mutta monissa tapauksissa liioiteltu. Jo vuosituhansien ajan ihmiset ovat käyttäneet bakteereita ruuan säilömiseen, maustamiseen ja tekstuurin muuttamiseen. Tästä hyviä esimerkkejä ovat juustot, jugurtit ja hapankaali. Kaikissa esimerkkitapauksissa raaka-aineen säilyvyys, maku ja tekstuuri ovat muuttuneet bakteerien vaikutuksesta. Tällaisilla tuotteilla on myös paljon positiivisia vaikutuksia ihmisen immunitettiin ja suolistoon. Kuitenkin useat haitalliset bakteerit ja niiden aiheuttamat taudit ovat ajaneet ihmiset pelkäämään bakteereita. [8.]

Haitallisia bakteereja, joita tulee sous vide- kypsennyksessä ottaa erityisesti huomioon ovat *kampylobakteerit*, *salmonellan* kaikki yli 2600 alatyyppeä, *shigellabakteerit*, *EHEC-bakteerit* ja *botuliinibakteeri*. Näistä 97 % on *kampylo-* tai *salmonellabakteerien* aiheuttamia sairauksia ja niistä noin 80 % on saatu ulkomailta. Suomessa tarttuneita 'ruokamyrkytyksen' oireita aiheuttavia bakteeritartuntoja tavataan vuosittain yli tuhat tapausta. [5.]

Sous vide- kypsennyksen riski on alhainen lämpötila. Usein lämpötilat voivat olla alle 60 celsiusastetta tai jopa alle 50 °C. Yleisesti riskirajana pidetään lämpötiloja 4 °C:n ja 60 °C:n välillä, koska tuolla välillä bakteerit lisääntyvät tai selviävät lyhyitä aikoja hengissä. Esimerkiksi Suomen Ruokavirasto suosittelee kanan kypsyttämistä kauttaaltaan 75 °C:seen. [6.] Tuossa lämpötilassa mahdolliset salmonellabakteerit kuolevat heti. Korkea lämpötila ei ole kuitenkaan ainoa asia, joka tappaa varmasti haitalliset bakteerit, nimittäin myös tarpeeksi pitkä kypsyntisaika alhaisemmalla lämpötilalla pastöroi lihan. Kanalla tämä tarkoittaa, että 75 °C:n sisälämpötilassa pastörinti on välitön, 71 °C:n lämpötilassa kestää pastörintiin 14 sekuntia, 68 °C 50 sekuntia ja 65 °C 3 minuuttia. Teoriassa kananlihalla voi mennä jopa alle 60 °C, jolloin pastörinti kestää yli tunnin, mutta kananliha muistuttaa siinä lämpötilassa enemmän raakaa kuin kypsää. Lähes kaikki bakteerit kuolevat 54,5 °C:n lämmössä, kunhan tuo lämpötila pysyy tarpeeksi kauan. [7.]

Sous vide- kypsennyksessä on välttämätöntä tietää sopivat kypsytyslämpötilat ja -ajat, jotta se voidaan suorittaa turvallisesti. On hyvä ottaa varman päälle ja pitää kypsytyssajat tarpeeksi pitkinä.

Muovin riskit lämpimissä olosuhteissa

Viime vuosina on noussut esiin muovin turvallisuus elintarviketeollisuudessa. Lukuisia tutkimuksia on tehty mikromuovijäänteistä ja terveydelle erityisen haitallisten muovien vaikutuksista. BPA eli bisphenol-A monomeeriä sisältävä muovi on jo monissa tutkimuksissa todettu ihmiselle vaaralliseksi. BPA on korvattu monissa muoviosissa jollain muulla monomeerillä, jotta näiltä negatiivisilta vaikutuksilta välttyttäisiin. Kuitenkin vuonna 2011 tehty tutkimus osoittaa, että yksikään muovi ei olisi täysin turvallinen lämpimissä olosuhteissa. Tutkimuksessa huomattiin, että monet muutkin muovit vapauttavat lämmitessään ihmiselle haitallisia kemikaaleja. Nämä kemikaalit aiheuttavat hormonaalisia häiriöitä, jotka voivat johtavat moniin haitallisiin seurauksiin ihmisen kehossa. Tutkimuksessa ei kuitenkaan tiedetty tarkalleen, kuinka paljon haitallisia kemikaaleja vapautuu ja mikä on käytännön vaikutus ihmisiin. [9.]



Kuva 1. Muoviin tyhjiöpakatut ruuat kypsymässä lämpöhauteessa. [19.]

Käytännössä muovien riskien arvioiminen jää jokaisen omalle vastuulle. Toisaalta näyttöä on negatiivisista vaikutuksista mutta toisaalta ei ole tarpeeksi näyttöä käytännön sovelluksista. Ravintola-alalla muovissa kypsentämistä pidetään kuitenkin täysin turvallisena menetelmänä. [7.]

2.3 Tyhjiökypsennyksen toiminta käytännössä

Tyhjiökypsennyksessä on nimensä mukaisesti tärkeää, että kypsennettävä ruoka on tyhjiöpakatussa muovipussissa, kuten kuvassa 1 näemme. Tämä on helpointa suorittaa tyhjiöpakkaajalla, mutta on myös mahdollista upottamalla se veden alle ja samalla puristamalla ylimääräisen ilman ruuan ympäriltä pois. Jos ilmaa jää pussiin niin ruoka saattaa kellua veden pinnalla tai se ei kypsenny tasaisesti. Vesi nimittäin toimii lähes kymmenkertaisena lämmönvälittäjänä ilmaan verrattuna. Kun ilma on saatu pussista pois ja ruoka on pussin sisällä, upotetaan se vesihauteeseen. Tyhjiökypsennyslaitteita on kahdenlaisia: astiaan kiinnitettäviä sirkulaattoreita ja oman astiansa sisältäviä

keittämiä. Käytännössä molemmat toimivat täysin samalla tavalla, mutta sirkulaattorit ovat pienempiä ja siksi paljon käytettyjä kotikeittiöissä. Seuraavaksi lämpötila asetetaan tarkasti sopivaksi juuri sille ruualle mitä ollaan valmistamassa. Esimerkiksi jos naudansihaa valmistetaan ja halutaan jättää se puolikypsäksi niin vesihaute asetetaan 56 °C ja annetaan pihvin olla vesihauteessa pihvin paksuudesta riippuen 1–2 tuntia. Tämän ajan jälkeen pihvi on täysin kypsä, 56 °C ja tarkalleen halutussa kypsyyssasteessa. Tämän lisäksi pihvistä on varmasti tuhoutuneet kaikki haitalliset patogeeneit ja se on turvallista nauttia. Usein loppusilauksena pihvi paistetaan nopeasti kuumalla pannulla tai grillillä, jotta se saa vielä lisää makua. Edellinen esimerkki voidaan suorittaa erilaisilla lihoilla, kasviksilla tai jälkiruuilla. Tärkeää on tietää kullekin ruoka-aineella oikea lämpötila ja aika, jonka kypsennetään sitä. Onneksi nykyään netti tarjoaa paljon tietoa eri ruoka-aineiden kypsennykseen. Kuvassa 2 nähdään tyhjiö- ja pannukypsennetyn pihvin ero 56 °C:n sisäkypsyyteen kypsennettynä. Tyhjiökypsennyksen lopputuloksena on tasaisempi kypsyyssaste.



Kuva 2. Vasen pihvi on kypsennetty Sous Vide-menetelmällä ja oikealla oleva valurautapannulla samaan sisäkypsyyssasteeseen. [16.]

Tyhjiökypsennys on monen asian vuoksi parempi kuin mikään muu kypsennystapa. Sillä pystytään saavuttamaan erittäin tarkkoja lopputuloksia, joihin mikään muu tapa ei pysty. Tämän lisäksi maku syvenee, liha mureutuu, suutuntumaa paranee ja ravintoarvot säilyvät erittäin korkeina. Mihin tämä perustuu? Liha sisältää yleensä noin 20 % proteiinia sen painosta. Loput ovat suurimmaksi osaksi vettä ja rasvaa. Kun lihaa kypsennetään, suurin osa sen proteiineista denaturoituu eli alkaa hajoamaan ja tässä prosessissa lihassyiden alkavat kutistua. Kutistuminen alkaa tapahtua noin 37 °C:ssa ja se jatkuu lineaarisesti, kunnes liha on noin 79 °C. Suurin osa lihan kypsennyksestä tapahtuu kuitenkin alle 60 °C:n lämpötiloissa, koska alle 60 °C:ssa lihassyiden kutistuminen

tapahtuu vaakatasossa ja suurin osa nesteestä pysyy lihassyiden sisällä. Kun lämpötila ylittää 60 °C:een, alkavat lihassyöt kutistua pitkittäisesti, joka johtaa nesteen häviämiseen lihassyistä. Tästä syystä liha usein kuivuu, kun sitä kypsennetään perinteisin menetelmin pannulla tai uunissa.

Toinen asia, joka vaikuttaa suuresti lihan makuun ja suutuntumaan, on kollageeni. Kollageeni on lihassyiden välissä oleva sidekudosaine, joka tekee lihasta sitkeää. Mitä enemmän kollageenia lihassa on, sitä sitkeämpää se on. Tämä ei kuitenkaan ole huono asia vesihaudekypsennyksessä. Kollageeni nimittäin alkaa hajota gelatiinimaiseksi aineeksi noin 54 °C:n lämpötilassa. Tällöin lihasta tulee mehukasta ja mureaa. Kollageenin hajoaminen tarvitsee yleensä pitkän ajan ja tästä syystä vesihaudekypsennys toimii tähän erinomaisena menetelmänä, koska se pysyy tarkkana asetetussa lämpötilassa, vaikka usean vuorokauden ajan.

Myös vihannekset on hyvä kypsentää vesihauteessa. Liian korkea lämpötila saa vihannesten soluseinämät hajoamaan, jolloin vihanneksien sisältämä vesi ja ravintoaineet alkavat häviämään. Myös hapelle altistuminen kypsentyessä johtaa vihannesten värin haalistumiseen. Kuva 3 havainnollistaa tämän hyvin. Tämän lisäksi monet vihannekset sisältävät pektiiniä, joka hajoaa kuumissa lämpötiloissa. Tämä johtaa huonoon koostumukseen ja makuun. [10.]



Kuva 3. Vihreitä papuja eri menetelmillä kypsennettynä. [17.]

3 PID-säädin

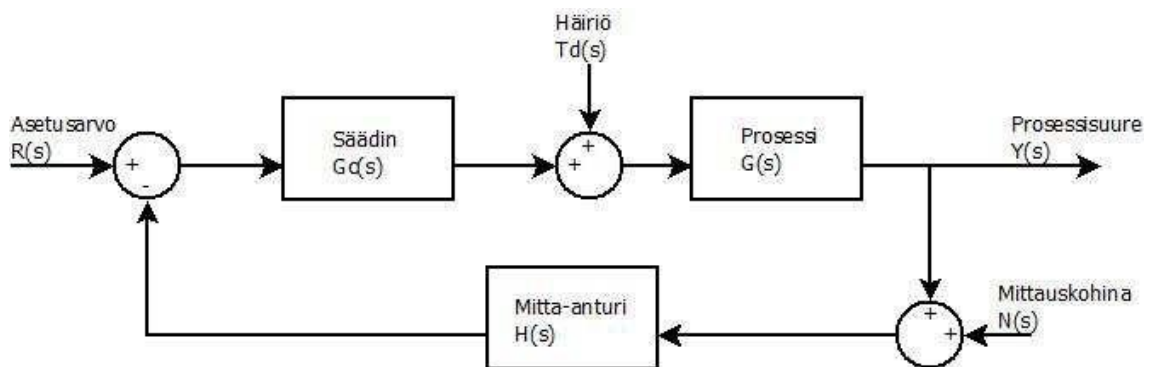
3.1 PID-säätimistä yleisesti

PID-säätimen nimitys tulee englannin kielen sanoista Proportional, Integral ja Derivative eli suomeksi Suhde, Integroiva ja Derivoiva. PID-säätimessä on siis kolme osaa, joille oikeat arvot virittämällä saadaan erittäin tarkka ja paljon käytetty säädin. PID-säätimellä on myös paljon muita muunnoksia, joissa ei huomioida yhtä tai kahta osaa tai yhdistellään eri osia. Yleisimmin käytössä oleva säädin on PI-säädin sen yksinkertaisuuden ja tarpeeksi tarkan lopputuloksen vuoksi. Varsinkin ensimmäisen asteen systeemeissä PI-säädin on lähes aina käytetty. Tämän voi helposti huomata tarkastelemalla Nyquistin käyrää: jos käyrä sijaitsee ainoastaan ensimmäisellä ja neljännellä sektorilla, silloin PI-säädin on tarpeeksi hyvä. [11, s.87.] Muita säätimiä ovat

P-säädin, joka on useimmissa tapauksissa yksin liian epätarkka, koska sille ei ole mahdollista huomioida säätövirhettä kokonaan itse. I-säädin itsessään voi olla toimiva, koska se osaa ottaa huomioon lineaarisia virheitä, mutta usein se silti tarvitsee P-osaa stabilointiin. Myös PD-säätimet ovat joskus käytettyjä systeemeissä, joissa ei tarvitse huomioida integraalista osaa.

PID-säädin perustuu yksinkertaiseen, mutta tehokkaaseen negatiiviseen takaisinkytkentään. Kuvassa 4 näemme perinteisen lohkokaaviokuvan takaisinkytkennästä. Negatiivisella takaisinkytkennällä pyritään mahdollisimman pieneen eroon sisään- ja ulostulosignaalin välillä. Negatiivisella takaisinkytkennällä saadaan siis vähennettyä häiriöitä ja saadaan stabilisoitua systeemiä. Tavoitteena on tietysti poistaa prosessissa esiintyvien häiriöiden vaikutus kokonaan.

Kun puhutaan automaattiohjauksella olevasta säätimestä, tarkoitetaan suljettua säätöpiiriä, jossa on takaisinkytkentäsilmutta. Käsiohjauksella taas tarkoitetaan systeemiä, jossa takaisinkytkentäsilmutta puuttuu kokonaan. [15.]



Kuva 4. Lohkokaaviokuva takaisinkytkennästä. [11, s.65]

3.2 PID-säätimen osat

PID-säädin koostuu kolmesta osasta: P eli suhdeosasta, I eli integroivasta osasta ja D eli derivoivasta osasta. Suhdeosa on verrannollinen erosuureeseen. Toisin sanoen suhdeosan ulostulo on aina sitä pienempi, mitä lähempänä se on halutusta mittausravasta. Integroiva osa osaa ottaa huomioon virheen ja säätää lähtöarvoa virheen pienentämiseksi. Tätä tapahtuu, kunnes virhe pienenee nollaan. Viimeinen osa on derivoiva osa, joka osaa ottaa huomioon myös tulevaisuuden virheet. Se ottaa huomioon erosuureen muutosnopeuden. Sillä saadaan usein stabiilisuutta systeemiin, mutta se voi myös aiheuttaa ylimääräistä kohinaa.

Suhdeosa

Kun puhutaan puhtaasta P-säätimestä, voidaan sen algoritmi kuvata kaavan 1 mukaisesti:

$$P_{ulos} = K_p e(t), \quad (1)$$

jossa K_p on säätimen vahvistus ja e on erosuure. Säätimen vahvistus on siis suoraan verrannollinen säätimen virheeseen. Kun vahvistusta kasvatetaan, järjestelmän vaste nopeutuu. Tämä osa hoituu yksinkertaisella kerto- ja yhteenlaskulla. Suhdeosa näyttää mitatun suureen ja halutun suureen suhteen.

Integroiva osa

Integrointiosa käyttää ohjaukseen järjestelmän (erosuureen) menneitä arvoja. Sen tehtävänä on eliminoida asetusarvon ja mittausravon väliset virheet. Integrointiosan takia pienetkin erosuureen arvot kasvattavat säätimen lähtöä. Integrointiajalla tarkoitetaan sitä aikaa, jossa integrointiosa tekee yhtä ison muutoksen ohjaussuureeseen kuin suhdeosa erosuureen muutoksessa. Kaavassa integrointiaika on $1/T_i$, joka tarkoittaa, että kun integrointiaikaa kasvatetaan, integrointiosan vaikutus pienenee. Kun taas integrointiaika on pieni, ohjauksen kasvunopeus on suurta.

Integroivan säätimen ohjaussignaali on kuvattu yleisesti kaavalla 2:

$$I_{ulos} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (2)$$

jossa K_i on säätimen vahvistus ja e on erosuure.

Derivoiva osa

Derivoiva osa ennustaa systeemin käyttäytymistä eli se pystyy korjaamaan poikkeamia jo silloin, kun ne eivät ole vielä muodostuneet tai kun ne alkavat vasta muodostua. Kun derivointiaika kasvaa, kasvaa myös derivointiosan vaikutus. Derivointiosa korostaa kohinaa, joten mittauksissa, joissa esiintyy merkittävästi kohinaa, on syytä käyttää pientä derivointiaikaa tai jättää D-osa kokonaan pois. Kaava 3 kuvaa derivoivaa osaa.

$$D_{ulos} = K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (3)$$

jossa K_d on säätimen vahvistus ja e on erosuure.

Osat yhdistettynä

Kun nämä kolme termiä yhdistetään, saadaan kaavan 4 mukainen PID-säätimen ulostulon algoritmi:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (4)$$

jossa K_p on suhdevahvistus, K_i on integrointivahvistus, K_d on derivointivahvistus, e on erosuure, t on aika ja τ on integroitava muuttuja.

Kuten aiemmin viitattiin, yleensä kaava halutaan muotoon, jossa näkyy integrointiaika ja derivointiaika. Kaava saadaan muunnettua parametrimuunnoskaavoilla 5 ja 6:

$$T_I = \frac{K_P}{K_I} \quad (5)$$

$$T_D = \frac{K_D}{K_P} \quad (6)$$

Ja näistä kaavoista saadaan muuntamalla kaavat 7 ja 8:

$$K_I = \frac{K_P}{T_I} \quad (7)$$

$$K_D = K_P T_D \quad (8)$$

Kun nämä termit sijoittaa kaavaan 4, saadaan ulostulon algoritmi, eli kaava 9:

$$u(t) = K_P \times \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^{t_1} e(t) dt + T_D \times \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (9)$$

jossa $u(t)$ on lähdön tila, K_P on säädön suhdevahvistus, $e(t)$ on erosuure, T_I on integrointiaika ja T_D on derivointiaika.

3.3 PID-säätimen viritysmetodit

Vaikka PID-säädin on toiminnaltaan yksinkertainen ja tehokas, niin se ei pysty toimimaan ilman oikeita säätöarvoja. Tässä luvussa käydään läpi yleisimpiä viritysmetodeja ja niiden hyötyjä sekä haittoja. Metodien valitseminen riippuu muutamasta tekijästä. Ensiksi on tärkeää määrittää, kuinka tarkan lopputuloksen haluaa. Toiseksi pitää huomioida säädettävän systeemin kompleksisuus eli se, minkä asteen systeemi on kyseessä. Lopuksi on hyvä ottaa huomioon kuka tulee käyttämään säädintä ja pitääkö hienosäätöjä tehdä vielä jatkossa. Suosituimmat viritysmetodit esitettiin Zieglerin ja Nicholsin toimesta vuonna 1942. Nämä metodit ovat laajassa käytössä, joko sellaisinaan tai niiden monien muunnelmien muodossa. Vaikka Zieglerin ja Nicholsin metodit ovat paljon käytettyjä, ne eivät takaa erinomaista tarkkuutta. Nykyään onkin kehitelty paljon tarkempia metodeja. [11, s.158.] Suuri osa virittämisestä tapahtuu ohjelmallisesti ja monesti automaattisesti.

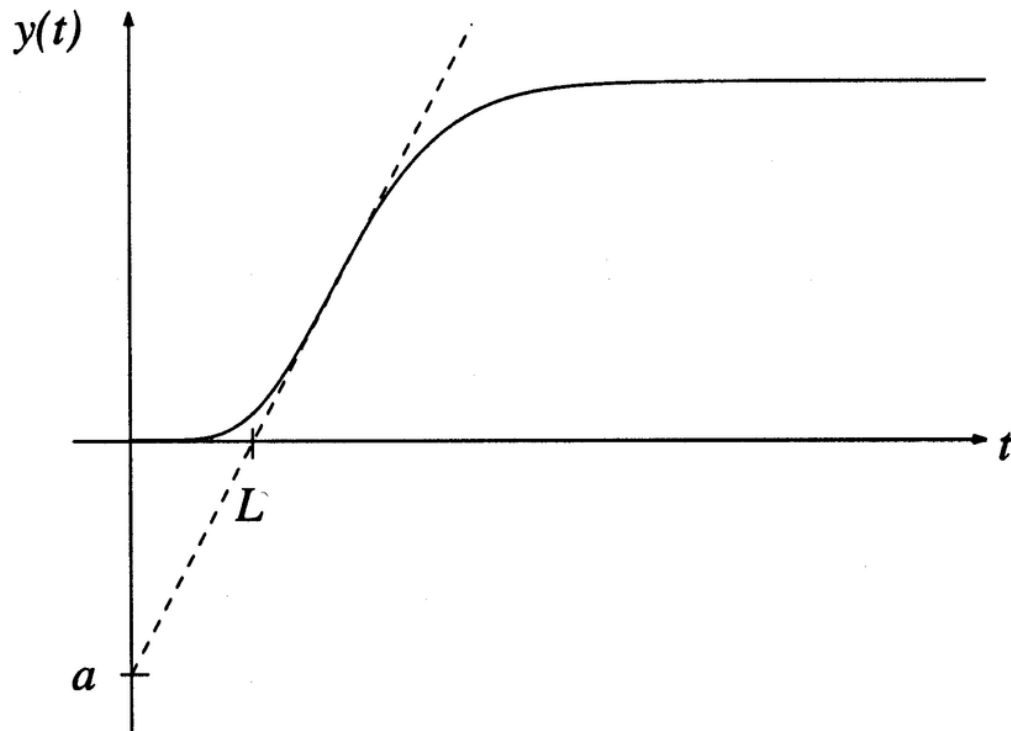
Ziegler-Nichols-metodit ja niiden variaatiot

Ziegler ja Nichols esittelivät kaksi klassista metodia PID-säätimen virittämiseen vuonna 1942 ja siitä lähtien ne ovat pysyneet laajassa käytössä muutamien muunnoksien kanssa. Ziegler-Nichols-metodi ei pysty samanlaiseen viritystarkkuuteen, kuin useammat uudemmat metodit, mutta se on säilyttänyt suosionsa helppoutensa vuoksi. Metodien nimet ovat avoimen piirin askelvastemenetelmä ja suljetun piirin taajuusvastemenetelmä. Ziegler ja Nichols antoivat säätimien arvot molempiin menetelmiin. Nämä arvot näkyvät taulukoissa 1 ja 2.

Taulukko 1. Ziegler-Nichols askelvastemenetelmän säädin-arvot. [11, s.160]

Säädin	aK	T_i / L	T_d / L
P	1		
PI	0,9	3	
PID	1,2	2	$L / 2$

Askelvastemenetelmä perustuu säätämättömän systeemin askelvasteen jyrkimpään kohtaan piirrettyyn tangenttiin. Tästä saadaan kaksi arvoa a ja L . Tangentin ja aika-akselin leikkauspiste antaa arvon L ja tangentin ja arvoakselin leikkauspiste antaa arvon a . Kuvassa 5 on havainnollistettu, kuinka arvot saadaan tangentin avulla.

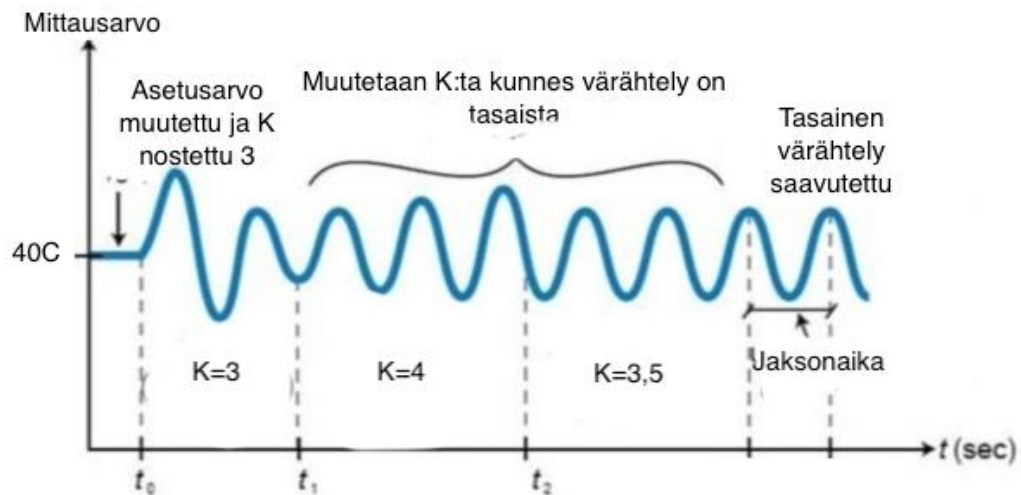


Kuva 5. Askelvastemenetelmä. [18, s.364]

Taajuusvastemenetelmä perustuu puolestaan systeemin vahvistusvaran kokeelliseen testaamiseen. Aluksi säädetään P-osalla niin, että integrointi- osa säädetään hyvin pieneksi ja derivointi- osa nolaksi, kunnes systeemi alkaa värähdellä. Kuten kuvassa 6 havainnollistetaan, P-osaa säädetään niin pitkään, että systeemi värähtelee harmonisesti. Siten P-osan ja värähtelyn jaksonajan perusteella voidaan laskea sopivat P-, I- ja D-termit. Ziegler ja Nichols ovat antaneet yksinkertaiset kaavat, joiden avulla voidaan laskea nämä termit. [11, s.161.]

Taulukko 2. Ziegler-Nichols taajuusvastemenetelmän säädin arvot ja kaavat. [11, s.161]

Säädin	K / K_u	T_i / T_u	T_d / T_u
P	0,5		
PI	0,4	0,8	
PID	0,6	0,5	0,125



Kuva 6. Taajuusvastementelmä. [14.]

Ziegler-Nichols-metodit antavat epätarkkoja arvoja, joten useimmissa systeemeissä on välttämätöntä tarkentaa saatuja arvoja manuaalisesti virittämällä. Manuaalinen viritys perustuu muutama perussääntöön: suhde- osan vahvistus vähentää systeemin stabiiliutta, virhe vähenee nopeammin, jos integrointiaikaa vähennetään, integrointiajan vähentäminen vähentää stabiiliutta ja derivointiajan kasvattaminen parantaa stabiiliutta. Nämä säännöt ovat hyvä runko manuaaliseen viritykseen. Usein manuaalinen viritys tehdään suljetussa piirissä, niin että suljetun piirin vastetta seurataan ja arvoja muutetaan sen mukaisesti. [14.]

Ziegler-Nichols-metodeilla on useita variaatioita. Niistä tunnetuimmat ovat Cohen-Coon-metodi ja CHR-metodi (Chien, Hrones, Reswick). CHR-metodi perustuu hieman eri sääntöihin ja tavoitteena on saada nopein mahdollinen vasteaika ilman ylitystä tai 20 % ylityksellä.

PID-säätimen ohjelmallinen viritys

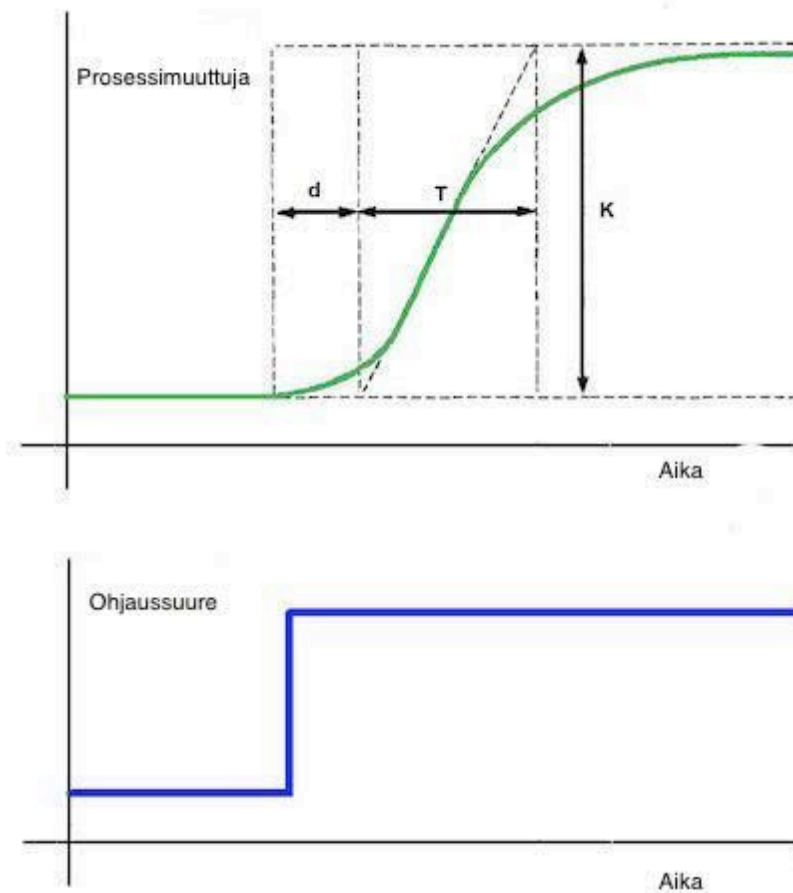
Nykyään suurin osa PID-säätimien virittämisestä tapahtuu ohjelmallisesti ja usein automaattisesti. Vaikka PID-säätimien virittämiseen olevia ohjelmia löytyy useita ja automaattinen virittäminen kuulostaa helpolta, ei se sitä usein ole. Virittäminen voi olla silti aikaa vievää ja vaikeaa. [12.]

Automaattiset ja itsevirittävät PID-säätimet ovat suunniteltu valitsemaan itse parhaat parametrien arvot perustuen jonkinlaiseen automaattiseen analyysiin prosessista. Nämä automaattiset toimenpiteet sisältävät matemaattisen mallin prosessin syöttö-tulosuhteesta, joka johdetaan prosessitiedoista. Näitä prosessitietoja täydennetään manuaalisesti muulla tarpeellisella informaatiolla.

Automaattista säätöä voidaan suorittaa sekä prosessin ollessa käynnissä että silloin kun se on käsiajolla. Usein käynnissä olevan prosessin viritystä kutsutaan itseviritykseksi ja käsiajolla olevan prosessin viritystä automaattiseksi viritykseksi. Molempia termejä kuitenkin käytetään sekaisin.

Tyypillisimmät automaattiset viritysohjelmat automatisoivat vain manuaaliset viritysmenettelyt, joita henkilö voi muuten suorittaa silmukkaa ajaessa: muuttaa ohjaustoimintaa, tarkkailla tuloksia ja säätää viritysarvoja tarpeen vaatiessa. Viritysohjelmat tarvitsevat siis tarkat säännöt, kuinka ne toimivat, ja ovat täten erityisen haavoittuvaisia virheiden ja häiriöiden tuomiin muutoksiin. Käyttäjän täytyy poistaa mahdolliset häiriöt ja mittausvirheitä aiheuttavat tekijät, sekä osata säätää alkuarvoja tietokoneen apuna. Hänen täytyy myös osata tulkita ohjelmaa, niin että tuloksiin voidaan luottaa. Usein automaattisella virityksellä saadaan hyvät ”aloitusarvot”, joita lähdetään säätämään manuaalisesti yrityksen ja erehdyksen kautta. Näin saadaan tarkka säädin, jonka alkusäätöön olisi manuaalisesti kulunut huomattavasti pidempi aika. [13.]

Klassinen tapa virittää PID-säädin automaattisesti on askelvastetestin kautta. Askeltestissä takaisinkytkentä on poiskytkettynä, ja ohjauksen hallintaan vaadittavaa ohjaussuuretta lisätään äkillisesti. Tästä syntyy reaktiokäyrä, josta voidaan analysoida matemaattinen malli käyrän käyttäytymiselle. Mallista saadaan säätöparametrien arvot, joita voidaan käyttää, kun säädin on taas takaisinkytketty. Kuvassa 7 prosessimallin kuollut aika d , aikavakio T ja vahvistus K voidaan muuntaa PID-säätimen vahvistus-, nopeus- ja nollausparametreiksi. Automaattinen viritysohjelma pystyy suorittamaan vastaavan askeltestin ja laskemaan viritysparametrit automaattisesti.



Kuva 7. Askelvastetesti. [12.]

Jotta PID-säädin saadaan viritettyä tarkaksi, on syytä tuntee ja ottaa huomioon mahdolliset systeemiin kohdistuvat häiriötekijät. Mahdollisia häiriöitä on prosessihäiriöt, kuormitushäiriöt ja mittauskohina. Mittauskohinaa saadaan pienennettyä suodattamalla signaalia. Kuormitushäiriö on usein askelmaista ja se voisi tässä esimerkissä olla se, kun veteen lisätään erilämpöinen raaka-aine kypsennettäväksi. Prosessihäiriöt ovat taas sellaisia häiriöitä prosessissa, jossa muuttuu jokin muu kuin prosessisuure. Jos säädin on viritetty erittäin nopeaksi eli vahvistus suureksi, myös häiriöiden suuruudet ovat merkityksellisempiä. [15.]

Ohjelmallisesti voidaan virittää monenlaisiin prosesseihin käyviä PID-säätimiä. Käyttäjän on syytä tuntee ohjelmat ja minkälaisiin viritysmetodeihin ne perustuvat. Eri

viritysmenetelmät toimivat eri prosesseihin. Mitään oikotietä ei tarkkaan ja luotettavaan PID-säätimeen ole.

4 Sous vide -keittimen toteutus

Vesihaudekypsennys on yleistynyt räjähdysmäisesti viime vuosina. Nyt valmiita ruuanvalmistukseen tarkoitettuja kiertovesipumppuja saa jo alle sadalla eurolla. Vielä kymmenen vuotta sitten vaadittava laitteisto olisi maksanut 500 €. Nyt ohjeita eri raaka-aineiden valmistukseen löytyy todella paljon, kun kymmenen vuotta sitten vain harva tiesi tai tunsikin vesihaudekypsennyksen salat. Tekniikan kehitys ja erityisesti avoimen lähdekoodin ohjelmistot ovat mahdollistaneet tarkat kotitekoiset PID-säätimet ja sitä kautta ne ovat rantautuneet myös ruuanlaittoon.

Keitin haluttiin toteuttaa mahdollisimman yksinkertaisesti, mutta niin että se olisi tarkka ja että sitä voisi kehittää jatkossa haluamallaan tavalla. Tärkeintä projektissa oli veden lämpötilan tarkkuus, koska se vaikuttaa suoraan haluttuun lopputulokseen. Päätettiin, että 0,5 °C:n tarkkuus riittää. Alle 0,5 °C:n tarkkuutta on vaikea toteuttaa koska silloin pitäisi olla tehokas lämpövästus, monta lämpöanturia ja tehokas kiertopumppu. Suurimmassa osassa raaka-aineista ei ole tärkeää päästä niin tarkkaan lopputulokseen veden lämpötilan säätämisessä, joten tämä rajattiin pois. Projektissa käytettiin lämpövästuksena 200 watin haudutuskattilaa. Laitteen kapasiteetti on 3,5 litraa. Tämä riittää kokeelliseen tarkasteluun. Kun työtä kehitetään, voidaan hankkia erillinen lämpövästus, jonka voi kiinnittää vaikka suureen 20 litran astiaan. Tällä tavalla saadaan enemmän raaka-aineita kypsennettyä samaan aikaan. Projektissa käytettiin digitaalista lämpöanturia DS18B20, joka on vedenpitävä ja jonka tarkkuus on $\pm 0,5$ °C, -10 °C:n ja +85 °C:n välillä. Tämä anturi todettiin hyväksi valinnaksi projektiin, koska se käyttää vain yhtä porttia kommunikointiin Raspberry Pi:n kanssa ja yhteen porttiin voi lisätä useita antureita. Anturin mittaama lämpötila-alue on -55°C - 125 °C. Suurin osa sovelluksista ruuanlaitossa tapahtuu 50 °C:n - 80 °C:n asteen välillä, joten tämä anturi soveltui erinomaisesti.

Verkkovirran muuntaminen toteutettiin kolmannen osapuolen sovelluksella, jotta välttyttiin sähköturvallisuutta vaarantavilta kytkennöiltä. Tarvittavaa laitetta ei Euroopasta

löytynyt, joten jouduttiin tilaamaan sellainen Yhdysvalloista. Onneksi laite toimi sekä 50 Hz että 60 Hz taajuuksilla. Seinäpistokkeeseen käytettiin adapteria. Yksinkertaisuudessaan sovellus sisältää releen, jota voi ohjata mikrokontrollerilla. Verkkovirtaa tarvitseva laite, tässä tapauksessa haudutuskattila, kytketään releen sisältävään pistorasiaan ja tämä kytketään verkkovirtaan. Ennen kytkemistä releen ohjauspinnit yhdistetään mikrokontrolleriin.

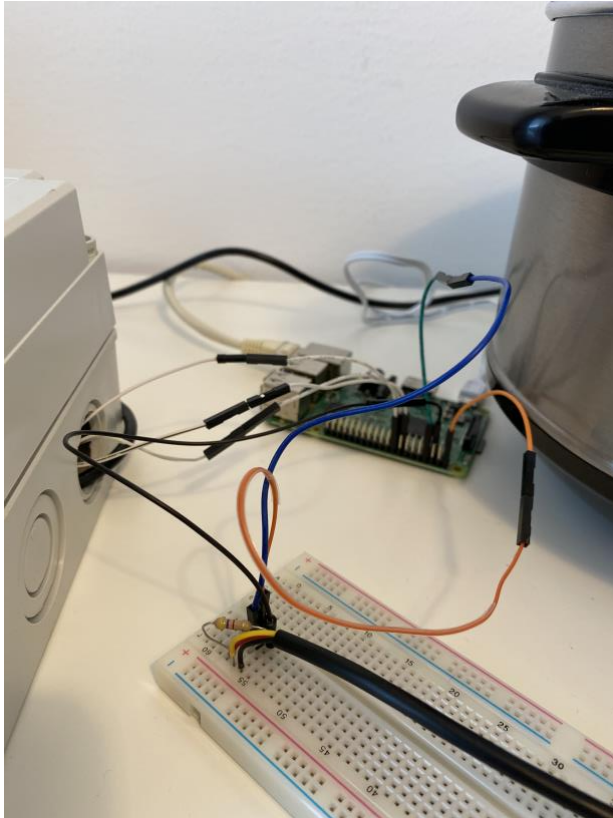
Mikrokontrollerina päätettiin käyttää Raspberry Pi:tä sen tehokkuuden, monikäyttöisyyden ja datan tallentamisominaisuuksien vuoksi.



Kuva 8. Testauslaitteisto.

Kaikki elektroniset komponentit suljettiin laatikkoon, kuten kuvassa 8 näkyy, koska oltiin sähkön ja veden kanssa tekemisissä. Näin eliminoitiin mahdolliset vahingot veden roiskumisen kanssa. Laatikosta tuli ulos vain virtajohto, ethernetjohto ja lämpötila-anturi. Raspberry Pi:hin oltiin yhteydessä langattomasti kannettavan tietokoneen kautta.

Raspberry Pi yhdistettiin langattomaan verkkoon ja pinnit relerasiaan ja lämpötila-anturiin.



Kuva 9. Kytännät koekytkentäalustassa ja Raspberry Pi:ssä.

Kuten kuvassa 9 nähdään, DS18B20- anturille on laitettu ylösvetovastus. Anturin datalehteä tutkimalla huomattiin, että lämpötila-anturin tiedonsiirto vaatii ylösvetovastuksen. Datalehden suosittelemana valittiin 4,7 kilo-Ohm:in vastus. [14.]

4.1 PID-säätimen ohjelmointi

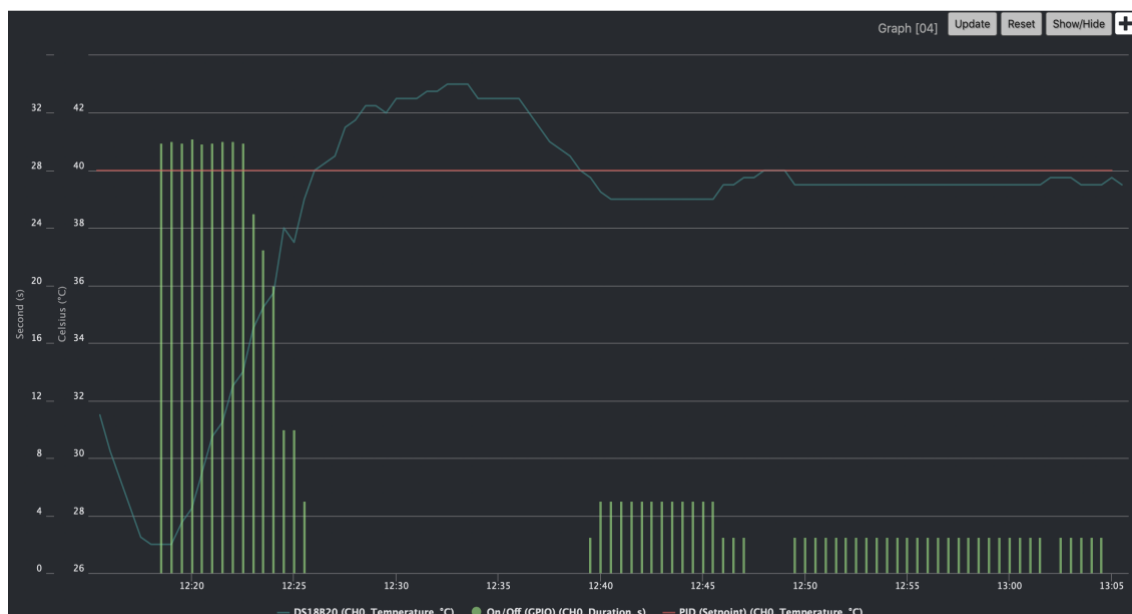
Valmiita PID-säätimien ohjelmia löytyy internetistä useille eri mikrokontrollereille. Tähän työhön valittiin ohjelma, joka toimii Raspberry Pi:n kanssa. Ohjelman nimi on Mycodo. Tämä ohjelma suunniteltiin alun perin käytettäväksi syötävien sienien kasvatukseen käytettävän laitteiston kanssa, mutta nyt se on kehitetty sovellettavaksi anturien lukemiseen, ulostulosignaalin ohjaamiseen tai näiden yhdistämiseen takaisinkytkennäksi, jolloin ohjelma pystyy lukemaan anturin arvoja ja säätämään systeemiä annettujen parametrien mukaan. Toisin sanoen ohjelmaa voi käyttää useisiin PID-säädintä vaativiin sovelluksiin. Mycodo on avoin lähdekoodiohjelma, jonka

kehitykseen ovat osallistuneet monet ohjelmoijat. Mycodon käyttö vaati hieman opettelua, mutta kun sen perustoimintaperiaate oli hallussa niin PID-säätimen toteutus oli yllättävän helppoa.

Perustoimintaperiaate PID-säätimeen liittyen on, että Raspberry Pi:hin yhdistetään rele, joka ohjaa lämpövastusta halutun lämpötilan saavuttamiseksi, lukemalla arvoja lämpötila-anturilta. Käytännössä eri PID-arvot pitävät lämpövastusta eri aikoja päällä, ja tarkoituksena on säätää systeemi, jossa haluttu lämpötila saavutetaan mahdollisimman nopeasti mahdollisimman pienellä ylityksellä.

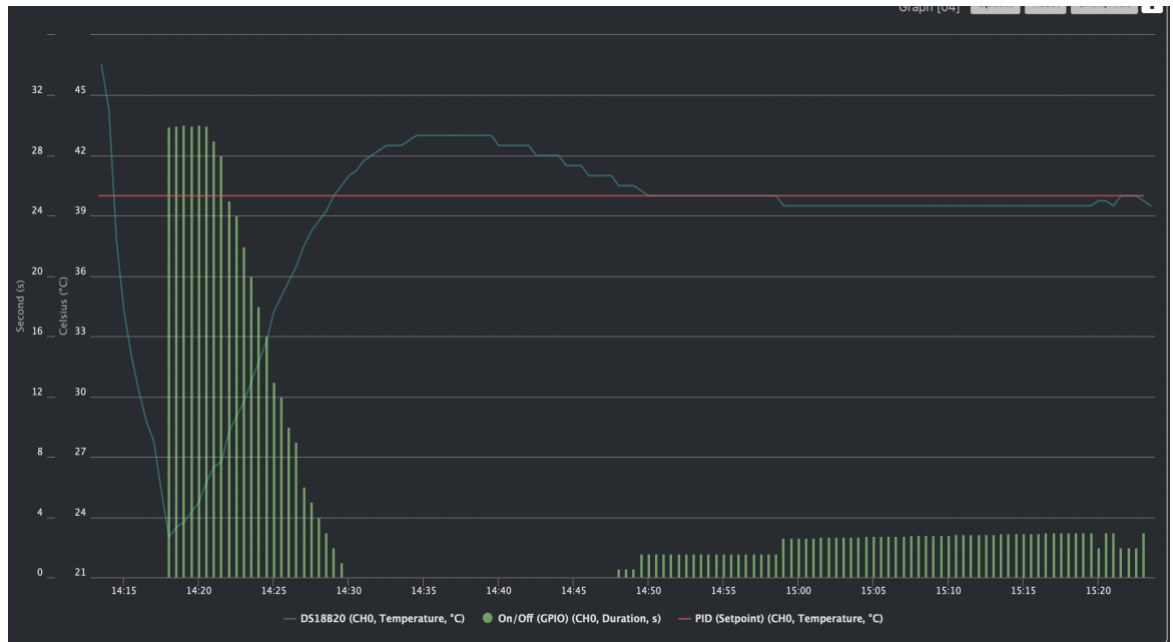
4.2 PID-säätimen virittäminen

PID-säätimen virittämiseen käytettiin kokeellista menetelmää. Aluksi asetettiin tavoitelämpötilaksi 40 °C ja lämpövastuksen maksimaaliseksi toiminta-ajaksi 30 sekuntia kerrallaan. Aloitettiin P-osan säädöstä. Aluksi kokeiltiin säätää P-osa suureksi ja sitten alkaa tiputtamaan P-osan arvoa alaspäin. Kun P:n kerroin oli 10, niin systeemi lämmitti veden nopeasti haluttuun lämpötilaan, mutta se meni myös reilusti yli halutun lämpötilan. Seuraavaksi P:n kerroin laskettiin 5, jolloin lämmitys oli käytännössä yhtä nopea, mutta ylitys ei aivan niin huomattava. Muutaman testin jälkeen huomattiin, että oli P-osan arvo mikä hyvänsä, ylitystä tuli joka tapauksessa. Täytyi alkaa säätämään myös I-arvoa. Kuvassa 10 huomataan P-säätimelle ominaisia piirteitä siitä, kuinka ylitystä tulee jonkin verran ja kuinka tasaista lämpötilaa ei saada aikaseksi, vaan kohinaa syntyy jonkin verran.



Kuva 10. Toinen testi, jossa aloitusarvot $P = 5$, $I = 0$ ja $D = 0$. Sininen käyrä kuvaa lämpötilaa ja ajassa 12:27 näemme säätöarvon ylityksen, joka on suurimmillaan $43\text{ }^{\circ}\text{C}$.

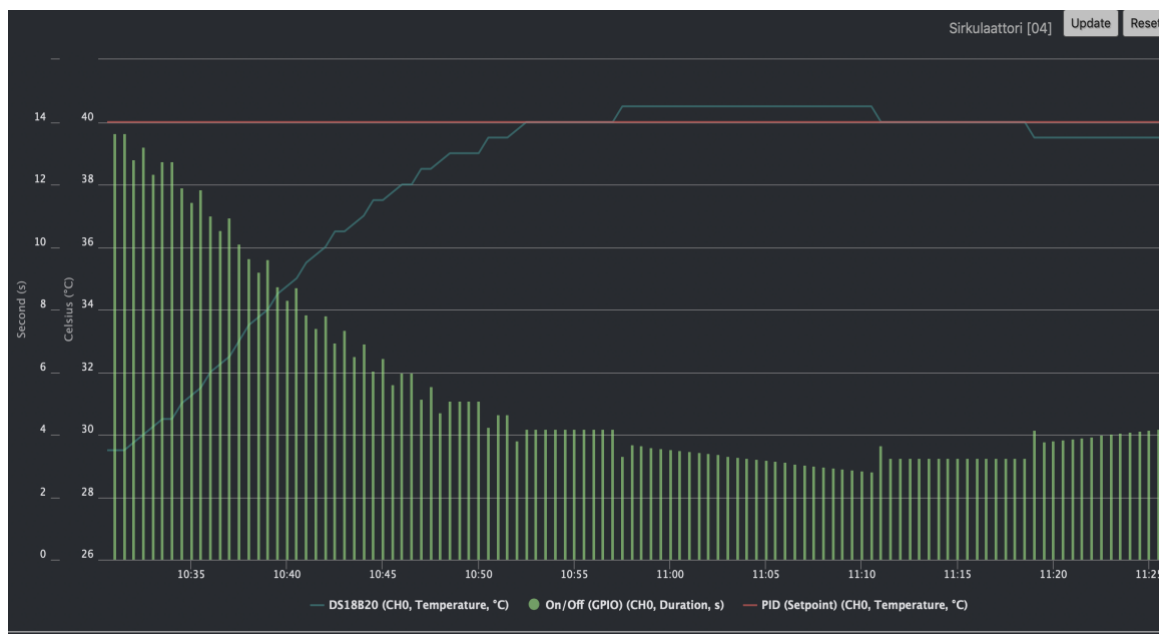
Säädettiin P-osa 2 ja sitten aloitettiin säätämään I-osaa. Huomattiin, että I-osaa säätämällä saatiin lämmittimen päälläoloaika järkevämmäksi. Kun ainoastaan P-osaa säädettiin, niin lämmitin oli päällä täydet 30 sekuntia, kunnes lämpötila oli $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, jonka jälkeen päälläoloaika pienentyi lämpötilamuutosten mukaan. Tässä vaiheessa systeemiin oli jo kuitenkin varautunut lämpöä niin paljon, että vaikka vastus olisi laitettu kokonaan pois päältä olisi tullut ylitystä. Kun alettiin säätämään I-osaa, niin vastus alkoi lyhentää päälläoloaika jo noin $26\text{ }^{\circ}\text{C}$:n kohdalla ja se osasi huomioida lämpötilannousun suhteessa vastuksen lämmitysaikaan huomattavasti paremmin. Tästä huolimatta ylitystä tapahtui yli sallittujen rajojen. Kuvassa 11 huomataan kuinka I-osan huomioiminen stabiloi systeemiä ja kohina pienenee merkittävästi.



Kuva 11. Aloitusarvot kuvan testissä $P = 2$, $I = 0,2$ ja $D = 0$. Ylitys ajassa 14:27, lämpötilan käydessä korkeimmillaan $43\text{ }^{\circ}\text{C}$.

P- ja I-osaa säätämällä saatiin systeemi, joka vakiintui haluttuun lämpötilaan noin puolessa tunnissa käynnistyksestä lähtien. Siinä mielessä tämä ei haittaa, kunhan odotetaan riittävä aika ennen kuin aloittaa halutun raaka-aineen kypsentämisen. PI-säätimen huono puoli tässä sovelluksessa olikin sallittujen rajojen ylitys.

Kun P- ja I-osa saatiin sopiviin arvoihin niin, että lämmitys oli nopeaa, mutta ylitys mahdollisimman pieni, alettiin säätämään D-osaa. D-kerrointa säätämällä saadaan yleensä stabiilisuutta systeemiin, koska se pystyy kompensoimaan arvioitua ylitystä. Näin kävi tässäkin sovelluksessa. Heti kun alettiin säätämään D-kerrointa, huomattiin sen välitön vaikutus systeemiin. Lämpötila nousi tasaisesti haluttuun lämpötilaan, jonka jälkeen se pysyi siinä $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ tarkkuudella seuraavan puolen tunnin ajan, jonka jälkeen mittausta todettiin onnistuneeksi. Tämä löytyy kuvassa 12.



Kuva 12. Ensimmäisen onnistuneen testin aloitusarvot olivat $P = 1$, $I = 0.09$ ja $D = 0.6$.

Onnistuneen testin jälkeen suoritettiin muutamia mittauksia samoilla arvoilla ja todettiin, että tulokset ovat hyvin samankaltaisia. Jokaisessa mittauksessa päästiin haluttuun lämmitysnopeuteen ja tarkkuuteen.

4.3 Kehitysehdotuksia

Tämä projekti suoritettiin niin sanotulla opiskelijabudjetilla eli mahdollisimman edullisesti. Raspberry Pi, koekytentäalusta, vastukset ja johdot maksoivat yhteensä 49 €. DS18B20 lämpösensori maksoi 15 €, releohjausyksikkö 20 € ja sähköinen haudutuspata alennuksesta 14 €.

Haudutuspadassa on 200 watin lämpövastus sisällä, jonka päällä on irrotettava keraaminen pata. 200 watin vastus lämmittää kattilaa suhteellisen hitaasti verrattuna vedenkeittimiin, joissa on 1000–2000 watin vastus. Suurempitehoisella vastuksella oltaisiin saatu nopeampi lämmitys ja suurempi määrä vettä lämpimäksi. Toinen ongelma, joka syntyi projektissa käytetystä haudutuspadasta, oli keraamisen padan paksuus ja täten lämmön sitomiskyky. Koska vastus oli sijoitettuna padan alle, pata itsesään varasi lämpöä, jolloin aluksi veden lämpötila nousi aivan liian korkeaksi ja kesti pitkään ennen

kuin se laski haluttuun lämpöön. Vasta pitkällisen virittämisen jälkeen saatiin PID-säädin huomioimaan pataan jo varattu lämpö, jolloin lämpötila ei mennyt kuin maksimissaan 0,5 °C yli tavoitteen.

Testaus- ja viritysvaiheessa käytettiin vain pientä, noin litran määrää vettä. Tämän määrän sekoittamiseen ei tarvittu erillistä pumppua, mutta pumpun kanssa tulokset olisivat todennäköisesti olleet vielä tarkempia.

Vastaavanlaiseen projektiin olisi siis tulevaisuudessa suositeltavaa käyttää ulkoista lämpövastusta, joka on tarkoitettu veden lämmittämiseen. Vastuksen tehon tulisi olla myös tarpeeksi iso. Vastuksen voisi kiinnittää 20 litran astiaan, jossa mahtuu valmistamaan suurempiakin määriä ruokaa kerralla. Näin suurella määrällä vettä olisi pakollista olla jo tehokas vesipumppu. Näin vesi sekoittuu koko ajan, eikä lämpene epätasaisesti. Suurempaan astiaan mahtuisi myös helpommin vesipumppu ja lämpöanturi, niin että ne eivät olisi ruoan tiellä.

5 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli rakentaa toimiva sous vide -keitin eli käytännössä lämmitävä kiertovesipumppu. Tavoitteena oli myös oppia virittämään PID-säädintä ja oppia sen teoriaa. Tavoitteissa onnistuttiin erinomaisesti. Virittäminen itsessään toteutettiin kokeellisesti, joka vei useita kymmeniä tunteja. Loppujen lopuksi saatiin kuitenkin omiin tarkoituksiin tarpeeksi tarkka ja nopea järjestelmä aikaiseksi.

Työn puitteissa opeteltiin myös Raspberry Pi:n ja Mycodo -verkkosovelluksen toimintaa yhdessä. Mycodo oli oiva valinta sen yksinkertaisuuden, mutta toisaalta myös monikäyttöisyyden ansiosta. Sen avulla pystyy reaaliaikaisesti seuraamaan lämpötilaa tai muuta haluamaa dataa. Tarvittaessa voi tehdä nopeasti muutoksia lämmittimen säätöihin, virittää säädintä ylipäättään tai sammuttaa koko systeemi.

Kun puhutaan ruoanlaitosta, on tärkeä ymmärtää hieman ruoan biologiaa ja riskitekijöitä. Tämä työ ei keskity niihin, mutta antaa perusymmärryksen asiasta. Kun on saatu

tarvittavat tiedot, voidaan suunnitella ja toteuttaa niiden pohjalta sovellus, joka vastaa tarpeeseen.

Työ antaa tarpeellisen tiedon ja keinot vastaavan projektin suorittamiseen. Kehitysmahdollisuuksia on paljon, ja pienellä investoinnilla saadaan aikaiseksi usean lämpövastuksen ja pumpun systeemi, vaikka ravintolakäyttöön. Mycodo olisi myös hyvä valinta tätä tarkoitusta varten, koska sillä voidaan hallitusti ohjata useampia erilisiä järjestelmiä yhtä aikaa. Esimerkiksi ravintolassa voi olla yksi keskusyksikkö, jolla ohjataan Mycodo -verkkosovelluksen kautta sous vide -keittämiä eri raaka-aineille, raakakypsytyskaappeja lihoille, fermentointikaappeja ja miksi ei muitakin keittiön laitteita. Nykyään monissa ammattilaislaitteissa on valmiiksi jo PID-säädin sisäänrakennettuna, mutta Mycodo -verkkosovelluksen ja muutaman työssä esitellyn komponentin avulla saisi rakennettua itsellensä sopivan systeemin vain murto-osalla ammattilaislaitteen hinnasta.

Lähteet

- 1 The History of Sous Vide, Explained. 2018. Verkkoaineisto. Cook's Illustrated. <https://www.cooksillustrated.com/articles/1142-the-history-of-sous-vide-explained>. Luettu 4.11.2019.
- 2 Holland, Chris. 2017. A Complete guide to the history & origins of sous vide. Verkkoaineisto. Sous vide tools. <https://www.sousvidetools.com/toolshed/a-complete-guide-to-the-history-origins-of-sous-vide/>. Luettu 4.11.2019.
- 3 Shingler, Tom. 2015. Sous vide: a history. Verkkoaineisto. Great British chefs. <https://www.greatbritishchefs.com/features/sous-vide-history>. Luettu 4.11.2019.
- 4 Hesser, Amanda. 2005. Under Pressure. Verkkoaineisto. New York Times. <https://www.nytimes.com/2005/08/14/magazine/under-pressure.html?mcubz=1>. Luettu 4.11.2019.
- 5 Lumio, Jukka. 2019. Kampylobakteerin, salmonellan, shigellan ja EHEC-bakteerin aiheuttamat suolistotulehdukset. Verkkoaineisto. Terveyskirjasto. https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk01187. Luettu 6.11.2019.
- 6 Usein kysyttyä salmonellavalvonnasta. Verkkoaineisto. Ruokavirasto. <https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/elintarvikeala/elintarvikealan-yhteiset-vaatimukset/omavalvonta/salmonellavalvonta/usein-kysyttya/>. Luettu 6.11.2019.
- 7 Is Sous Vide Safe? Verkkoaineisto. 2018. Cook's Illustrated. <https://www.cooksillustrated.com/articles/1131-is-sous-vide-safe>. Luettu 6.11.2019.
- 8 Yttri, Jennifer. Bacteria: the Good, the Bad, and the Ugly. Center4Research. Verkkoaineisto. <http://www.center4research.org/bacteria-good-bad-ugly/>. Luettu 6.11.2019.
- 9 Environ Health Perspect. 2011. Most Plastic Products Release Estrogenic Chemicals: A Potential Health Problem That Can Be Solved. Verkkoaineisto. The National Center for Biotechnology Information. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3222987/>. Luettu 8.11.2019.
- 10 Hughes, John. 2017. The Science Behind Sous Vide Cooking – And How To Explain It To Your Friends. Verkkoaineisto. Science meets food. <http://sciencemeetsfood.org/science-behind-sous-vide-cooking-explain-friends/>. Luettu 11.11.2019.

- 11 Åström, Karl Johan, Hägglund, Tore. 2006. Advanced PID Control. North Carolina, ISA.
- 12 Pros and cons of autotuning control: Part 1. 2018. Verkkoaineisto. Control Engineer. <https://www.controleng.com/articles/pros-and-cons-of-autotuning-control-part-1/>. Luettu 20.7.2020.
- 13 Dallas Semiconductor. Datasheet DS18B20. <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf>. Luettu 25.9.2020.
- 14 Harju, Timo, Marttinen, Arto. 2000. Säättötekniikan koulutusmateriaali. Verkkoaineisto. https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1367/pid_kirja_1-1.pdf. Luettu 20.7.2020.
- 15 Nijhuis, Michelle. 2017. Three Billion People Cook Over Open Fires – With Deadly Consequences. Verkkoaineisto. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.com/photography/proof/2017/07/guatemala-cook-stoves/>. Luettu 4.5.2020.
- 16 How to cook steak sous vide? Verkkoaineisto. Sansaire. <https://sansaire.com/cook-steak-sous-vide/>. Luettu 8.10.2020.
- 17 England, Thomas. 2016. Cooking sous vide. Verkkoaineisto. <https://publicism.info/food/sous/2.html>. Luettu 8.10.2020.
- 18 Basilio, Matos. 2002. Design of PI and PID Controllers With Transient Performance Specification. Rio de Janeiro, IEEE.
- 19 Sous vide astia kannella. 2019. Verkkoaineisto. Vakuumikauppa. <https://www.vakuumi.fi/sous-vide-astia-kannella-p-667.html>. Luettu 12.10.2020.