



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Energiatehnoloogia instituut

TERMILISE DEAERAATORI ARVUTUSE ALGORITMI VÄLJATÖÖTAMINE

DEVELOPMENT OF CALCULATION ALGORITHM FOR THERMAL DEAERATORS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Aleksey Petrov

Üliõpilaskood: 162981MASM

Juhendaja: Andrei Dedov

Konsultant: Andrei Ingelberg

Tallinn, 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri

Energiatehnoloogia instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Aleksey Petrov, 162981MASM
Õppekava, peeriala: MASM02/15 – Soojusenergeetika
Juhendaja(d): Andrei Dedov, dotsent, tel. 620 3913, Andrei.Dedov@taltech.ee
Konsultandid: Andrei Ingelberg, protsessi insener, ESTANC AS, 55 970 681,
Andrei.Ingelberg@estanc.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Termilise deaeraatori arvutuse algoritmi väljatöötamine*
(inglise keeles) *Development of calculation algorithm for thermal deaerators*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. termiliste deaeraatorite tüüpide ja konstruktsioonide kirjeldamine.
2. deaeraatori arvutuse algoritmi väljatöötamine.
3. deaeraatori arvutus väljatöötatud algoritmi abil.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö idee sõnastamine, juhendajaga kooskõlastamine.	03.12.18
2.	Teemakohase kirjandusega tutvumine, sisendandmete kogumine ja analüüs.	11.02.19
3.	Termilise deaeraatori arvutuse algoritmi väljatöötamine.	18.03.19
4.	Reaalse deaeraatori arvutus väljatöötatud algoritmi abil.	08.04.19
5.	Kokkuvõtte kirjutamine, lõputöö vormistamine	30.05.19

Töö keel: Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** “.....”201....a

Üliõpilane: Aleksey Petrov “.....”201....a
/allkiri

Juhendaja: Andrei Dedov “.....”201....a
/allkiri

Konsultant: Andrei Ingelberg “.....”201....a
/allkiri

SISUKORD

SISUKORD	4
EESSÕNA	6
SISSEJUHATUS	7
1. DEAERAATORITE TÜÜBID JA TÖÖPÕHIMÕTE.....	9
1.1. Deaeraatorite tüübid.....	9
1.2. Deaeraatorite konstruktsioon ja põhielemendid.....	12
1.3. Deaeraatorite tööpõhimõte.....	15
2. TERMISE DEAERAATORI ARVUTUSE MEETODID	17
2.1. „PTM“ meetod	17
2.2. „ЦКТИ“ meetod.....	18
2.3. „UMP“ meetod.....	19
2.4. HEI meetod.....	21
2.5. Meetodite analüüs	21
3. ALGORITMI VÄLJATÖÖTAMINE	22
3.1. Sisendandmed.....	22
3.2. Voode segunemine ja pihustite arv.....	23
3.3. Siseneva vee hapniku kontsentratsioon	24
3.4. Soojusbilanss	25
3.5. Kolonni suurus.....	27
3.6. Jaotustsooni arvutuse algoritm.....	30
3.6.1. Jaotustsooni arvutus „PTM“ meetoditega	31
3.7. Heitauru arvutus	33
3.8. Ühenduste suuruse arvutamine.....	33
3.9. Toiteveemahuti suuruse arvutamine	34
3.10. Barbotaaži hüdrodünaamiline arvutus.....	36
3.11. Eelsoojendustoru hüdrodünaamiline arvutus.....	38

3.12. Deaeraatori käivitamise põhimõte.....	38
4. ARVUTAMISE NÄIDE ARENDATUD MEETODI ABIL	40
4.1. Põhilised deaeraatori rikked ja nende kõrvaldamine	47
4.2. Algoritmi täiendused.....	48
KOKKUVÕTE.....	50
SUMMARY	51
KASUTATUD KIRJANDUS.....	52
LISAD	54
LISA 1. Taldriktüüpi deaeraatori joonis	55
LISA 2. Deaeraatori arvutuse plokk-skeem	56

EESSÕNA

Antud magistritöö teema on välja pakutud ettevõtte ESTANC AS poolt. Töö ülesandeks on termilise deaeraatori arvutuse algoritmi väljatöötamine.

Töö juhendajaks on Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituudi dotsent Andrei Dedov ja kaasjuhendajaks ESTANC AS protsessiinsereer Andrei Ingelberg. Autor tänab oma juhendajaid oma ideede ja ettepanekute eest. Eraldi autor tänab ettevõtte ESTANC AS väljapakutud lõputöö teema eest.

Märksõnad: Deaeraator, Hapniku desorbtsioon, Programmi algoritm, Soojusarvutus, Toiteveemahuti.

SISSEJUHATUS

Tänapäeval ühist standardit deaeraatorite arvutamise valdkonnas kahjuks ei ole. Deaeraatorite tootjad reeglina oma arvutusmetoodikaid ei avalikusta. Kirjandusest on kättesaadavad ainult neli metoodikat mis omal ajal olid avalikustatud juhendmaterjalina või uurimistöödena erinevates kõrgkoolides ja uurimisinstituutides. Kahjuks need metoodikad on vananenud ning neid pole võimalik kaasaegsete deaeraatorite valmistamisel kasutada. Seega Eesti ettevõttel Estanc AS, mis toodab rõhu all töötavaid surveseadmeid ja samas hulgas ka deaeraatoreid, tekkis vajadus olemasolevate metoodikate ja ettevõtte kogemuse põhjal välja töötada arvutamise enda oma algoritmi. See oligi võetud antud lõputöö põhieesmärgiks.

Lõputöö esimeses peatükis tutvustatakse deaeraatorite üldehitusega ja konstruktsioonidega, räägitakse kus ja milleks kasutatakse deaeraatoreid ning nende töö põhimõttest. Samuti kirjeldatakse deaeraatorite käitamisel olevaid probleeme ja nende lahendamise võimalusi.

Teine peatükk toob esile olemasolevad arvutusmeetodid ning nende meetodite lühikirjeldus.

Kolmas peatükk näitab lõputöö põhiosa, mille sisse kulub deaeraatori arvutusalgoritmi väljatöötamine olemasolevate meetodite baasil.

Neljas peatükk hõlmab välja töötatud algoritmi baasil arvutamise näidet ning ka jutustab tulevatest uuringutest ja täiendustest.

Antud töö eesmärgiks on:

- termiliste deaeraatorite tüüpide ja konstruktsioonide kirjeldamine.
- deaeraatori arvutuse algoritmi väljatöötamine.
- deaeraatori arvutus väljatöötatud algoritmi abil.

Antud lõputöö aitab arendada ettevõttel siamaani olemasoleva arvutusprogrammi ning annab ülevaate arvutuse struktuurist. Algoritm muudab olemasolevat programmi lihtsamaks ja arusaadavamaks, jagab programmi mooduliteks, mis võimaldab arvutada erinevaid etappe. Algoritmi põhjal saab leida ja parandada programmi vigu ning anda võimalust programmi edasi arendamiseks ja täiustamiseks.

Uuritav teema on maailmas aktuaalne, sest see annab võimalust tagada elektrijaamade ning soojusvõrgu ettevõtete töid ilma avariideta ja tootlikkuse alanemiseta. Tootlikkuse alanemine võib olla põhjustatud vee ettevalmistamise, soojusjõuseadmete või soojusvõrkude süsteemide pindade

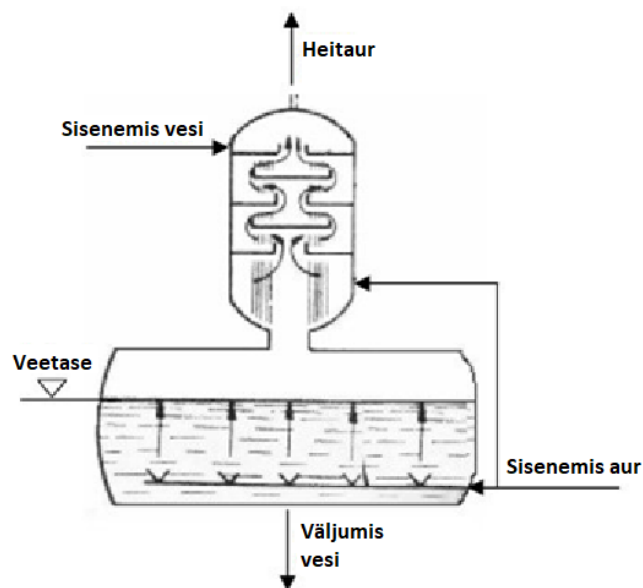
korrosiooniga või katlakivi ja sette tekkimisega. Korrosiooni omakorda kutsuvad esile vees lahustunud gaasid, hapnik ja süsinikdioksiid. Seega katlavesi peab olema gaasidest puhastatud ehk deaereeritud. Kui deaeraator süsteemis on puudu või ta eemaldab gaase katlaveest ebapiisavalt võib see põhjustada süsteemis avarii või täis peatumise, oleks see soojuse või elektri eratootmine või kogu riigi tarbeks elektrit toodav soojuselektrijaam.

Töö lõpus olev kokkuvõte annab töötulemustele omapoolse hinnangu ning samuti hinnatakse saadud töötulemuste väärtusi.

Antud lõputöö raames väljatöötatud algoritmi hakatakse kasutama deaeraatorite arvutamiseks ettevõttel Estanc AS.

1. DEAERAATORITE TÜÜBID JA TÖÖPÕHIMÕTE

Deaeraator on seade, mis sooritab deaereerimise või termilise degaseerimise protsessi ehk puhastab vedeliku hapnikust ja süsihappegaasist. Joonisel 1.1. on toodud deaeraatori skemaatiline ehitus. Joonisel on kujutatud põhilised auru sisepritse- ning deaereeritud vee sisse- ja äravoolukohad. Põhilised deaeraatorite probleemid on nende suured gabariidid. Samuti probleemide hulka kulub ka suhteliselt kõrge varustuse ühiku hind. Vaatamata sellele deaeraator mängib tähtsa rolli paljude projektide ahelas.



Joonis 1.1. Deaeraatorite skeem [1]

1.1. Deaeraatorite tüübid

Termilised deaeraatorid jagunevad tööõhu ja vee-auru faaside kokkupuute viisi järgi. Deaeraatorite tüübid ja klassifikatsioon on hästi kirjeldatud uurimistöös [2]. Tööõhu järgi eristatakse järgmised deaeraatorite tüübid:

- Vaakumdeaeraatorid
- Atmosfäärdeaeraatorid
- Kõrgrõhudeaeraatorid

Kaasaegsed deaeraatorid töötavad „libiseva rõhu“ põhimõttel. See tähendab seda, et kui siseneva auru rõhk sujuvalt muutub, siis paigaldis jätkab tööd tavarežiimis tootlikkuse vähendamata. Selline aparaadi tööviis annab lisaökonoomsust. [2]

Tänapäeval atmosfäär- ja kõrgrõhudeaeraatorite vahel ei ole erinevust ning käsitletama nagu üks tüüp - survesead. Vaakumdeaeraatorid enamasti kasutatakse veekatlamajal ning antud töös ei ole käsitletud.

Uurimistöö [3] autor samuti teatab, et faaside kokkupuute viisi määrab deaeraatori konstruktsioon. Tavaliselt kaasaegsed deaeraatorid on kombineeritud selle pärast, et ühes deaeraatoris reeglina rakendatakse mitut üksteisest erinevat deaereerimisseadet. Selle juures eristatakse järgmised deaereerimisseadmete tüübid (deaeraatorite erielemendid):

- Juga-piisk (taldriktüüpi), milles faaside eraldamise pind on moodustatud auruvoos vabalt langevate veejugade pinnaga;
- Barbotaažtüüpi, milles aurumullide kujul soojendav soojuskandja jaotub veevoos;
- Kelmetüüpi, kus faaside eraldamise pind on moodustatud vee kelmetaolise voolamisega auruvoos;
- Pihustüstüüpi, milles vesi jaotub auruvoos piiskade kujul.

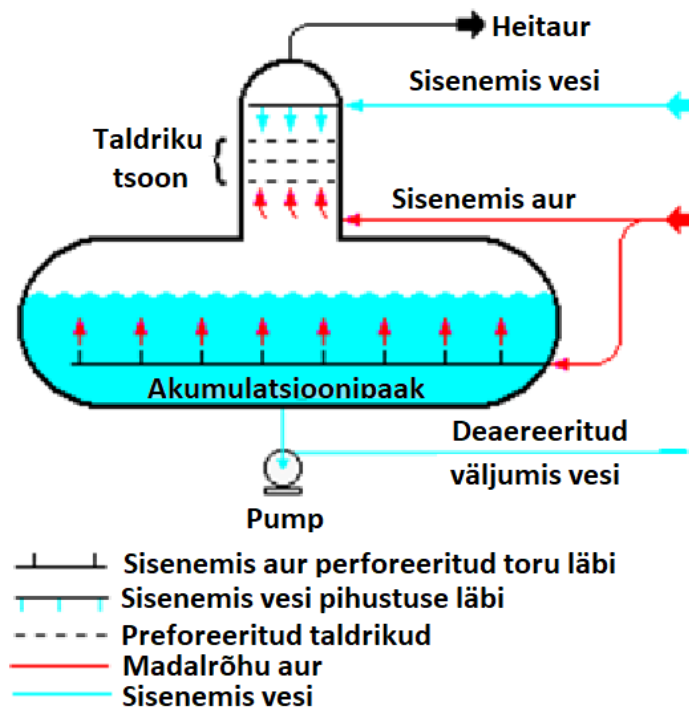
Faaside eraldamise pind saab olla tinglikult fikseerituna nagu näiteks kelmetüüpi deaereerimisseadmetel või fikseerimata nagu – barbotaaži-, joa-, piisktüüpi deaereerimisseadmetel. [3]

Estanc AS ettevõtte toodetakse kahte tüüpi deaeraatoreid, taldriktüüpi ja pihustüstüüpi deaeraatorid. Mõlemad tüübid on kombineeritud koos barbotaažiga.

Joonisel 1.2. on kujutatud taldriktüüpi deaeraator. Tavaliselt horisontaalne taldriktüüpi deaeraator omab vertikaalset deaereerimiskolooni. Kolonn on paigaldatud katla toitevee horisontaalse paagi peal. Deaereerimata vett juhitakse ülevalt vertikaalsesse deaereerimiskaamerasse, kus ta voolab alla läbi deaereerimiskolooni perforatsioonid taldrikute avade ning sattub toitevee paaki. Madala rõhuga auru juhitakse alt, kust voolab ülesse taldrikute vahel ning pihustab veejugasid piiskadeks. Mõnedes deaeraatorite konstruktsioonides kasutatakse erinevate membraanide ja tihendite tüüpe perforatsioonid taldrikute asemel. [4]

Vees lahustatud gaas läheb üle auru-gaasi faasi. Auru-gaasi segu eemaldatakse kolonnist ülevalt läbi heitauru ava. Tavaliselt heitauru ava on varustatud klapiga, mis reguleerib heitauru kogust ning avaneb

etteantud rõhu ületamisel. Selliseks rõhuks on küllastunud auru rõhk deaeraatori töötemperatuuril (atmosfääri tüüpi deaeraatoritel 102-110 °C). Mõnedes konstruktsioonides võib olla ette nähtud heitauru soojusvaheti kondenseerimiseks ja soojuse tagastamiseks süsteemi. Deaereeritud vesi voolab horisontaalsesse kogunemispaki, kust seda edastatakse auru generaatorisse. [4]

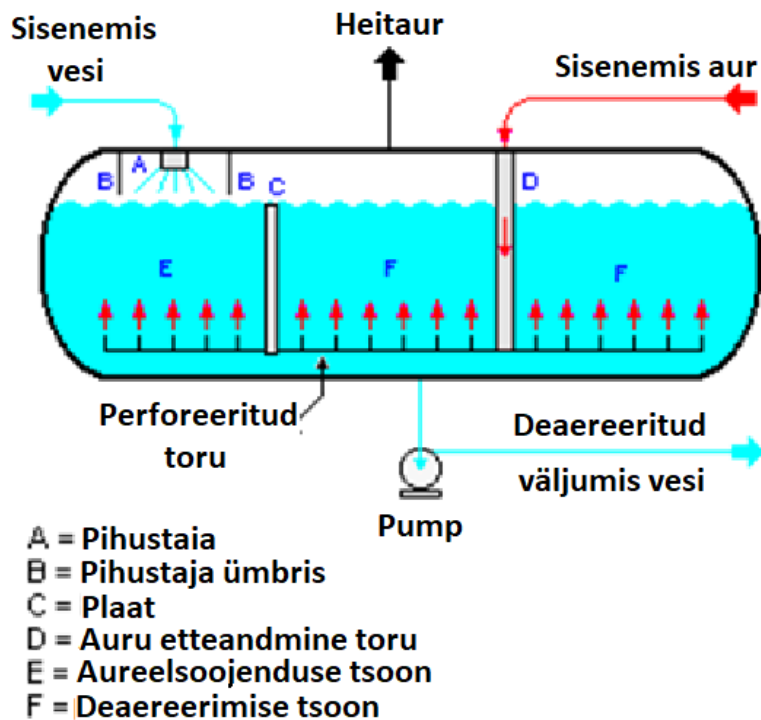


Joonis 1.2. Taldriktüüpi deaeraator [5]

Paljudes deaeraatorite konstruktsioonides osa aurust juhitakse perforeeritud toru kaudu, mis asub paagi alumises osas vee pinna all. Aur hoiab veetemperatuuri ettenähtud tasemel ning lisaks deaereerib vett barboteerimisega. [4]

Deaeraatori soojuskadude vähendamiseks välisjahtumisest ning katlamaja personali termiliste vigastuste vältimiseks, deaeraatori välispinda soojuslikult isoleeritakse. [4]

Joonisel 1.3 on kujutatud pihustustüüpi deaeraator. Tavaliselt pihustustüüpi deaeraator kujutab endast horisontaalse mahuti, millises on auru eelsoojendamise (E) ning deaereerimise (F) tsoonid. Need tsoonid on eraldatud plaadiga (C). Madalrõhu auru juhitakse toitevee paaki alumises osas asetseva auru kammi kaudu. [4]



Joonis 1.3. Pihustustüüpi deaeraator [5]

Toitevett pihustatakse tsoonis (E), kus seda soojendatakse auruga. Pihusti (A) ning veesoojendustsooni toimel vesi saavutab külastus punkti edasiseks vees lahustatud gaaside eemaldamiseks deaereerimistsoonis. Eelsoojendatud siseneva vesi sattub deaereerimistsooni (F). Vee deaereerimine tsoonis (F) toimub barboteerimise abil. Veest eraldatavad gaasid eemaldatakse kogumi ülal osas asuva ventilatsiooni kaudu. Samuti ventilatsiooni trakt varustatakse auruvoo reguleeritavaga klapiga, mis tagab signaaliseeriva aurujoa olemasolu. Deaereeritud siseneva vett pumbatakse auru genereerivasse paigaldise sisse deaeraatori alumisest osast. [4]

Iga deaeraatori tüübile on omased eelised ja puudused. Näiteks, pihustustüüpi deaeraator on kompaktsem, kuid kallim, kui taldriktüüpi deaeraator. Taldriktüüpi omab suured gabariidid. Mõlemad tüübid toimuvad hästi.

Antud töös uuritakse taldriktüüpi deaeraatori, mis on kujutatud joonisel 1.2.

1.2. Deaeraatorite konstruktsioon ja põhielemendid

Deaereeritava veele esitatavate kvaliteedinõuete määramine oluliselt sõltuvad sisendvee koosseisust, paigaldise tüübist ja parameetritest, rakendatava põhivarustusest (aurukatlad, turbiinid),

kaugkütesüsteemist ja soojaveearustuse süsteemist. Termilise veetöötlemise rakendamisel meetodi ökonoomsus sõltub samuti varustuse karakteristikutest ja parameetritest. Selle pärast, enne deaeraatori tööpõhimõtte vaatlemist, tuleb vähemalt üldistatult tutvuda deaeraatori konstruktsiooniga ja põhielementidega.

Taldrikutüüpi aparaadi üldine konstruktsioon asub Lisas 1. Joonisel on esitatud kõik termilise degaseerimisseadme elemendid, sealhulgas otsakud sisendauru, siseneva ja väljuva vee tarbeks, inspeksiooniluuk, vee tase mõõtmise nahad paigaldise siserõhu ja -temperatuuri mõõtmisotsakud ning tugevdamiskonstruktsioon.

1. Kolonn kujutab endast hermeetilise terasepaagi, mis on ühendatud kogunemispaaigiga ääriku või keevitamise abil. Suure koormuse puhul kogumispaaigi ja kolonni korpuses kinnitatud vertikaalsed talad tagavad kolonni kaalu ning tasakaalu. Kolonni sees paiknevad perforeeritud taldrikud. Kolonni materjal on tavaliselt roostevaba teras X2CrNi18-9 (1.4307) või suure gabariidi puhul võib olla teras P265GH (1.0425). Sisenemis osad tavaliselt happekindel materjalidest X2CrNiMo17-12-2 (1.4404).
2. Kollektor kujutab endast endasse sulgunud paindunud roostevaba toru, mis on ühendatud deaeraatori veevarustus ühendustega. Kollektori alumises osas paiknevad pihustid, millede kaudu vett pihustatakse ja edasi vesi sattub kolonni ülemisele taldrikule. Kollektori nominaalsuurus peab olema suurem või võrdeline kogu juurde veeühenduste läbikäidava ristlõike pindalate summaga.
3. Pihusti tagab kondensaati soojendamise küllastustemperatuurini ja laiaulatusliku massidevahetustsooni. Pihusti kujutab endast vedru abil reguleeriva düüsi, mis tagab pihustamise stabiilset kiirust muutliku vee hulga juures. Veejaotusseade on ette nähtud veevoogude segunemiseks. Pihusteid kinnitatakse vahetult kollektori muhvidele, mis lihtsustab nende tehnilise revisiooni ja remondi ilma „mittekeevate“ voode torustiku demonteerimiseta. Veejaotusseadmest ülespool asub piiskniiskuse koos heitauruga ära viimise tõkestav raimakilp.
4. Taldrikud kujutavad endast perforeeritud teraseplaadi ääristega, et vesi ei voolaks üle äärt ja tagaks hüdrodünaamilise truki. Vesi voolab alumisele taldrikutele avade kaudu, tekitades mitme jugade, millede vahel läbib kuum aur. Joo läbimõdu suurus sõltub taldriku ava läbimõõdust. Kuna vee küllastuse tingimustes hapniku lahustustegur on praktiliselt võrdne nulliga, kandub hapnik veepiskadest ümbritsevasse auru. Aur kondenseerub veepinnal, mille tõttu hapniku kontsentratsioon suureneb pihusti ümbruskonnas.

5. Kogumispaak kujutab endast tsilindrilise korpusega mahutit, mis on hermeetiliselt kokku keevitatud mõlemalt poolt poolkerakujuliste põhjadega. Juurde- ja äraveetavate voogude ning mõõteseadmete jaoks omab paak mitmeid ühendused.
6. Vahesein kujutab endast kogumispaagi vormi järgi lõigatud teraselehe, mille suurus on väiksem, kui siseläbimõõt. Selle paigaldatakse kohe pärast pihustit pihustustüüpi deaeraatori puhul ning kohe peale taldrikute taldrikutüüpi puhul. Peamiseks vaheseina ülesanneks on vee liikumise ja segunemise tekitamine kogumispaagis.
7. Keeristemurdja takistab väljundühendustest vee keerisvoo tekkimise. See soodustab väljundpumbas hüdroloökide ennetamist ja pikendab pumba eluiga.
8. Loomuliku veetaseme regulaatorina mängib rolli ülevool. Juhul kui vesi tõuseb HHWL tasemest kõrgemale, siis see sattub sellesse ühenduse.
9. Mõõteseadmete tarbeks kogumispaagis on ettenähtud ühendused. Mõõteseadmed koguvad deaeraatori korrektse töö jaoks vajalikud mõõteandmed ning edastavad infot lugemisseadmele, mis näitab üldist pilti. Tavaliselt kasutatakse magneti veetase andurid ja kaug lugemis andurid.
10. Kaitseklapp asub tavaliselt kogumispaagi ülaosas. Selle peamine otstarbe on deaeraatori ülerõhu vältimine.

1.3. Deaeraatorite tööpõhimõte

Kasutades joonise Lisas 1 vaatleme taldriktüüpi deaeraatori tööpõhimõtet. Aurukateldes, turbiinides ja teistes tööstusallikates tööd teinud vesi voolab suletud kontuuriga välistarbimise süsteemis, ehk kogu vesi sattub deaeraatori toitekollektorisse. Milles kõik veevood segunevad ühtlase temperatuuri ja rõhuni. Seejärel vesi sattub pihusti kaudu deaeraatori kolonni. Pihustid tagavad jugade ühtlase jaotamise kogu ülemise taldriku ulatuses sõltumata deaeraatori veekulust ja tootlikkusest. Pihustatud vedelik satub perforeeritud taldrikutele kõrgemate ääristega ning koguneb nendes. Avade kaudu satub vesi järgnevale taldrikule kuni barbotaažseadmeni. Vee deaereerimine toimub ka mööda perforeeritud barbotaažkoonust, mille kaudu edastatakse auru. Deaereeritud vesi tõuseb kindla kõrguseni ning voolab üle ääre akkumuleerimispaaki.

Auru edastatakse ühenduste läbi: S1 – edastus barbotaažseadmele ning S2 - edastus deaeraatori käivitamiseks. Sattudes barbotaažseadmele, aur tuleb avadest läbi, seejärel saabub kolonni, tõuseb vabalt kukkuvate vedeliku jugadest läbi, millega soojendab neid küllastustemperatuurini. Küllastustemperatuuri toimel veest eralduvad hapnik ja muud ebavajalikud lisandid, milliseid heidetakse deaeraatorist koos aurustamisega kolonni ülalosas asuva ühenduse kaudu.

Termilise degaseerimisprotsessist, mis toimub kolonni sees jutustab [4] autor:

Gaas saab erineda vedelikus järgmistel kujudel:

- Lahustatud mollekulite kujul,
- Hüdrofooblisandite ümber tekkivate mikromullikeste (10-7 mm) kujul
- Tehnoloogilise tsükli järgnevates staadiumites lõhustuvate gaasi eraldusega keemiliste ühendite koosseisus (näiteks, NaHCO_3)

Deaeraatoris toimub faasidevaheline massidevahetus vedeliku ja auru-gaasi segu vahel. Vedelikus lahustatud gaasi kontsentratsiooni C_g kineetiline võrrand, gaasi tasakaalu kontsentratsiooni C_g^l (arvestades kogusega teises faasis) juures lähtuvalt Henri seadusest, näeb välja järgnevalt: [4]

$$\frac{\Delta C_g}{\Delta \tau} = kf(C_g^l - C_g) \quad (1)$$

kus

τ — aeg; [s]

f — faaside eralduse eripind;

k — kiiruse koefitsient, mis sõltub üksikasjalikult eriomase difusioonteelt, mille gaas peab läbima vedelikust pääsemiseks.

Ilmselt, vedelikust gaaside täiusliku eemaldamiseks on tarvis $C_g^l = 0$ (gaasi partsiaalrõhk vedeliku üle peab lähenema nullile, ehk eraldatud gaasid peavad olema aktiivselt eemaldatud ja asendatud auruga) ja lõpmatu protsessi kulgemise aeg. Praktikal need seatakse tehnoloogiliselt lubatuna ja majanduslikult otstarbekaga degaseerimise sügavusega. [4]

Difusioon desorptsioonil põhinevatel termilistel deaeraatoritel vedeliku sojendatakse külastus temperatuuri; selle juures gaaside lahustusvõime on ligilähedane nullile. Tekkiv aur (heitaur) viib gaasid ära (C_g^l alaneb), aga difusiooni koefitsient on kõrge (k suureneb). [4]

2. TERMILISE DEAERAATORI ARVUTUSE MEETODID

Lõputöö aluseks oli võetud firma Estanc AS mitmeaastane töökogemus deaeraatoritega ning allpool loetletud allikad. Töös kasutatud arvutusmeetodid ja iga meetodi lühitutvustus:

- „PTM“ meetod, mis on toodud tehnilises juhendmaterjalis „Termiliste deaeraatorite arvutus ja projekteerimine“ [6]
- „ЦКТИ“ meetod [7], mis on väljatöötatud Tsentraalses Katlaturbiiniinstituudis („ЦКТИ“ Sankt-Peterburg, Venemaa)
- „UMP“ meetod [8], mis on väljatöötatud ülikoolis “Universiti Malaysia Pahang” (UMP, Malaisia)
- „HEI“ meetod [9], mis on väljatöötatud instituudis “Heat Exchange Institute” (HEI, USA).

2.1. „PTM“ meetod

Meetod „PTM“ 108.030.21-78 oli leiutatud ja kasutusele võetud aastal 1978. Tehniline juhendmaterjal kehtib aurukatelde ning avatud ja suletud süsteemide siseneva veest korrosiooni-agressiivsete gaaside eemaldamiseks mõeldud deaereerimiskolonnidest ja deaeratsiooni paakidest koosnevatele deaeraatoritele ja määrab antud deaeraatorite arvutuse ning projekteerimise meetodikat [6].

Tänapäeval see standard on kehtiv. See oli välja töötatud V.A. Permjakov, A.S. Gimmelberg, G.M. Vihanski, J.M. Šubnikov.

Vastavalt „PTM“ meetodile taldriktüüpi deaeraatorites desorbeerunud hapniku kogust arvutatakse valemiga:

$$\ln \frac{O_{2\ in}}{O_{2\ out}} = C_B \cdot \frac{L}{d_h^{0,7}} \cdot w_j^{-0,3} \cdot w_L^{0,3} \cdot \left(\frac{m_{cond.i}}{m_{w.in}} \right)^{-0,5} \quad (2)$$

kus

$O_{2\ in}$ ja $O_{2\ out}$ – hapniku kontsentratsioonid joa alguses ja lõpus [mg/kg]

C_B – tegur, mis on määratud vastavalt töö rõhule (joonis 2.1).

L – joa pikkus [m]

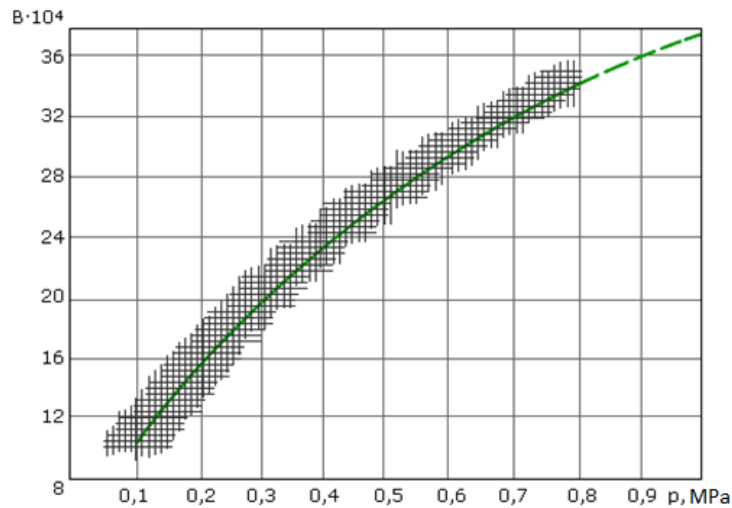
d_h – taldriku ava diameeter [m]

w_j – vee keskmine kiirus väljumisavas [m/s]

w_L – joa kiirus [m/s]

$m_{cond.i}$ – kondenseeritud auru kogus [kg/s]

$m_{w.in}$ – veekulu [kg/s]



Joonis 2.1 B teguri määramiskõver [6]

2.2. „ЦКТИ“ meetod

Tsentraalse katlaturbiinistituudis „ЦКТИ“ tuletatud kriteeriaalne võrrand, mis kirjeldab degaseerimisprotsessi taldrikutüüpi deaeraatorites [7]:

$$\lg \frac{C_1}{C_2} = 0,27 \frac{L}{d_t} \text{Lap}^{0,15} \text{Fr}^{-0,15} K^{0,5} (\text{Pr}')^{-1} \quad (3)$$

kus

L – joa pikkus [m]

d_t – taldriku vee väljumisava diameeter [m]

Lap , Fr , K и Pr' – Laplas, Froude, Kutateladze ja Prandtl'i kriteeriumid.

$$\text{Lap} = \frac{\rho w_s^2 d}{\sigma}, \text{Fr} = \frac{w_w^2}{g d_h}, \text{Pr}' = \frac{V_w}{D_w}, K = \frac{r}{c(t_2 - t_1)} \quad (4)$$

kus

w_s – auru keskmine kiirus veejugade kimbus [m/s]

w_w – vee keskmine kiirus väljumisavas [m/s]

ρ – veetihedus [kg/m³]

d_h – taldriku ava diameeter [m]

g – raskuskiirendus [m/s²]

V_w – vee kinemaatiline viskoossuskoefitsient [m²/s]

D_w – hapniku molekulaarne difusioonitegur vees [m²/s]

r – aurustumissoojus [kJ/kg]

c – vee isobaariline erisoojus [kJ/(kg*K)]

Valem on rakendatav ka lahustatud hapnikuga küllastamata vee puhul, ehk juhul, kui vees hapniku kontsentratsioon on tasakaalu kontsentratsioonist väiksem antud temperatuuri ja rõhu juures. Meetodi kasutamiseks peavad olema täidetud järgmised nõuded: jugade pikkusel 180 kuni 550 mm auru rõhk kolonnis peab olema 1,5 kuni 8,0 kgs/cm²; taldriku avade läbimõõt peab olema kuni 6 mm; veevoolu kiirus taldriku avades 0,4 kuni 1,2 m/s. Peale selle suurus ($\rho_s W_s^2$) ei pea ületama järgmisi väärtusi: 30 Pa jugade pikkusel 180 mm; 6 Pa jugade pikkusel 325 mm; 2 Pa jugade pikkusel 475 mm.[7]

2.3. „UMP“ meetod

Meetod oli välja töötatud Malaisia ülikoolis UMP [8]. Meetodi aluseks on eksperimentaaluuringud. Vastavalt antud meetodile desorbeerunud hapniku kogust arvutatakse valemiga:

$$\frac{O2(t)}{O2_{in}} = \exp \left\{ -4 \frac{Sh_j D_w t}{\delta d_j} \right\} \quad (5)$$

kus

t – aeg [s]

$\frac{O2(t)}{O2_{in}}$ – siseneva ja väljuva vee hapniku kontsentratsioonide suhe [mg/kg]

Sh_j – Sherwoodi number

D_w – hapniku molekulaarne difusioonitegur vees [m^2/s]

d_j – joa läbimõõt [m]

δ – Nusselt kelme paksus, [m]

Valemi aluseks on järgmised piirangud Sheerwood'i arvu kohta (Sh):

$$Sh_j = 2.24 \times 10^{-2} Re_j^{0.8} Sc_j^{0.5} \text{ for } 12 \leq Re_j \leq 70 \text{ and } Sc_j \geq \frac{2.32 \times 10^4}{Re_j^{1.6}} \quad (5.1)$$

$$Sh_j = 8.0 \times 10^{-2} Re_j^{0.5} Sc_j^{0.5} \text{ for } 70 \leq Re_j \leq 400 \text{ and } Sc_j \geq \frac{1.82 \times 10^3}{Re_j} \quad (5.2)$$

$$Sh_j = 8.9 \times 10^{-4} Re_j^{1.25} Sc_j^{0.5} \text{ for } Re_j \geq 400 \text{ and } Sc_j \geq \frac{1.47 \times 10^7}{Re_j^{2.5}} \quad (5.3)$$

kus

Re_j – Vedelikujoa Reynoldsi arv

Sc_j – Vedelikujoa Schmidt'i arv

Antud meetod ei leidnud aset selles uurimistöös ja Estanc programmis katsete ajal leitud piirangute tõttu. Selline meetod oli väljatöötatud ning on rakendatav ainult järgmistel tingimustel:

$$0.33 < m_w < 0.125 \frac{kg}{s}; 350 < \frac{l_N}{D_N} < 600; 1.1 < \frac{\tau_{sat}}{\tau_{w\ dea}} < 1.4$$

kus

m_w – veekulu [kg/s]

l_N – ühenduse pikkus [m]

D_N – ühenduse läbimõõt [m]

τ_{sat} – küllastus temperatuur [°C]

$\tau_{w\ dea}$ – deaereeritud vee temperatuur [°C]

2.4. HEI meetod

Antud meetod oli välja töötatud USA soojusvaheti instituudis „HEI“ ning jätkuvalt uuenes. Tänapäeval on kehtiv aastal 2016 välja antud 10 versioon [9]. Standardist puudub hapniku desorbtsiooni kriteeriaalne võrrand, kuid standardis antakse soovitusi konstruktsiooni valimise ja projekteerimise osas ning ka soovitusel hüdrodünaamilise arvutuse läbiviimiseks.

2.5 Metodite analüüs

Ennem kirjeldatud valemist (1) järgneb, et soojuse- ja masside vahetuse intensiivsusele mõjub aeg ja faaside eraldamise eripind, mis leidis aset kõigis hapniku desorbtsiooni valemities (2, 3, 5). Joa kõrgus, läbimõõt ning kiirus on kasutusel kõikides eelmainitud võrrandites.

„PTM“ meetod oli välja töötatud 30 aastat tagasi ning selle puuduseks on ainult konstantse joa voo arvutus. Praktikas pole voog deaeraatoris püsiv, aga on piisk ja joafaaside kombinatsioon.

„ЦКТИ“ töödes oli tõestatud, et kolonni edastatava vee temperatuuri alanemisega, veest lahustatud gaaside eemaldamise protsessi intensiivsus kasvab. See on seletatav sellega, et vee temperatuuri alanemine viib soojendava auru kulu kasvamiseks ning järelikult ka kolonni sektsioonides auruvoo kiiruste suurenemiseks. Autor G.V Leduhovski aga väitis töös [10], et veetemperatuuri alanemise puhul märkimisväärselt muutub ka gaaside lahustamise võime vees, mis peaks samuti desorbtsiooni protsessi kiirusele mõjuma.

Antud uurimistöö eesmärk on koostada olemasoleva programmi algoritmi mis hõlmab „PTM“ meetodi ja ESTANC AS kogemus. „PTM“ meetodi mõned komponendid ja arvutus valemid ei ole käsitletud algoritmis, kuna „PTM“ meetod on juba vananenud. Selle tõttu uurimistöö käigus oli osaliselt analüüsitud „ЦКТИ“ meetod ning toodud välja Estanci poolt arendatud valemid.

3. ALGORITMI VÄLJATÖÖTAMINE

Algoritm on täpne ja ühemõtteline eeskiri antud liiki ülesannete lahendamiseks või tegevuste täitmiseks kindla eesmärgi saavutamisel. Algoritm määrab, milliseid tegevusi ja millises järjekorras peab selleks täitma. Mõiste algoritm pärineb matemaatikast, kuid seda kasutatakse ka mujal: retseptid, juhendid, stsenaariumid – kõik need on eeskirjad e algoritmid. Eriti palju kasutatakse seda mõistet seoses rakenduste loomise ja programmeerimisega [10].

Antud peatükk hõlmab lõputöö põhiosa. Lisas 2 on esitatud terminilise deaeraatori arvutusalgoritmi kirjeldav plokk-skeem.

Algoritm oli välja töötatud terminilise deaeraatori arvutamise programmi alusel kui ettevõtte Estanc AS töötajatele mõeldud juhend. Algoritmi aluseks said punktides 2.1 ja 2.2 kirjeldatud meetodid.

Deaeraatori terminilise arvutuse puhul võib tekkida probleem juhul kui klient edastab ebapiisava informatsiooni, kuid, algoritm tagab arvutuse struktuuri ülevaadet. See omalt poolt aitab ettevõtte töötajal antud probleemi lahendust leida. Deaeraatori arvutamiseprogramm omab küllaltki kõrget sisenemiskünni. Algoritm lubab teha programmi lihtsamaks ning kergemini mõistetavaks. Täpsemaks arvutamiseks on tarvis programmi jaotada mooduliteks, milliseid on mugav arvutada eraldi. See aitab teha ökonoomsemat ja kiiremat arvutust. Plokk-skeemi kujuline algoritm annab täiuslikku ettekujutust arvutuskäigust, lisaks sellele, et see aitab vigu parandada olemasolevas programmis, see annab võimaluse programmi edasiseks parandamiseks ja lihtsustamiseks.

3.1. Sisendandmed

Sisenandmed – on väga olulised deaeraatori arvutamiseks (Lisa 2). Esialgssed andmed hapnikusisalduse jaoks arengu arvutamiseks on algse ja lõpliku sisaldus deaereeritud vees. Soojusarvutus eelneb hapniku arengu arvutamisele.

Tänapäeval programmi on rakendatud „PTM“- ja „ЦКТИ“-meetodid, ning puudub selge arvutuse struktuur. Töö eesmärgiks on välja töötada algoritmi abil selget arvutusstruktuuri.

Sisendandmed saab jagada gruppidele:

- Siseauru andmed
- Sisevee andmed
- Deaeraatori suuruse andmed

- Hapnikusisaldus andmed väljavees

Vee ja auru andmed sisaldavad informatsiooni rõhust p [bar(a)], temperatuurist t [°C] ja kulust m [kg/s]. Gabariitide andmed sisaldavad informatsiooni kolonni ja paagi suuruselt. Ära minevate voode andmed peavad sisaldama andmed vees hapniku kontsentratsioonist mg/kg, mis on paigaldise jaoks garantii väärtus. Deaeraatori suuruse andmed saab üles otsida aproksimeerimismeetodiga nende puudumise juhul.

Kliendi poolt edastavate andmete puudulikkuse pärast arvutuse algoritmis tekkivad „lüngad“, millised tuleb täita teiste teada olevate andmete arvelt. Näiteks kui klient ei tea kolonni gabariitmõõde, neid saab üles leida pärast kolonni soojusarvutust. On tarvis määrata tinglikke suurusid, seejärel kanda sisse teada olevad andmed. Saadud tulemuse kasutatakse joasektsiooni ja hapniku desorbtsiooni arvutamiseks. Seejärel tulemust võrreldakse kliendi poolt edastatud maksimaalse hapniku kontsentratsiooniga vees. Kui tulemus on nõutust madalam, siis tuleb kolonni suuruse suurendada seni, kuni positiivne tulemus on saavutatud.

Kliendile arvutuse lõpptulemus võib olla sobimatu, näiteks liiga suurte dimensioonide poolest. Selle tõttu projekteerimise algstaadiumis on tarvis välja selgitada võimalikult palju sisendandmeid.

Algoritmi koostamiseks oli valitud neli siseneva kondensaadi voo erinevate allikate poolt, üks ettevalmistatud sisendvee voog veekadude taastamiseks süsteemis, käivitamise tarbeks üks auruvoog, üks deaereerimise järel ära minev auruvoog. Antud kombinatsioon on lihtne näide ja ei arvesta mitte keevate lisavoode ning lisa auru mahavalamised deaeraatorisse. Nii auru kui ka vee sisendvoode arv saab olla praktiliselt suurem. See saab olla järgnevate peatükis 4.1. kirjeldatud uuringute teemaks. Neli siseneva kondensaadi voo on optimaalseim hulk algoritmi lihtsustamiseks.

3.2. Voode segunemine ja pihustite arv

Veejugade tutsid paiknevad ühel horisontaaltasapinnal veejaotusseadmega tasemel. Veejaotusseade on ette nähtud veevoogude segunemiseks ja selle peenestumiseks jugadeks.

Joatüüpi deaereerimiskolonnides veejaotamiseks kasutatakse põhiliselt kollektoreid. Joad saavad olla erineva veekuluga. Seadmes peab olema tagatud erineva deaeraatorisse sisendtemperatuuriga veejugade hea segunemine, sest ebaühtlane vee temperatuuri jaotamine kolonni ristlõikes halvendab deaereerimise efektiivsust.

Voode segunemisel kasutatakse kõikide sisenevate veevoogude keskmised väärtused:

$$m_{w.in} = \sum(m_1 + m_2 + m_3 + m_i) \quad (6)$$

kus

$m_{w.in}$ – siseneva vee kogu voluhulk [kg/s]

$m_{1...3...i}$ – siseneva vee voluhulk erinevatest kohtadest [kg/s]

Temperatuuri, rõhu, tiheduse ja entalpia leidmise jaoks, kasutatakse järgmised valemid.

Vee temperatuur $T_{w.in}$ - [°C]

$$T_{w.in} = \frac{\sum(m_i \cdot T_i)}{m_{in.total}} \quad (7)$$

Siseneva vee rõhk $P_{w.in}$ - [Bar(a)]

$$P_{w.in} = \frac{\sum(m_i \cdot P_i)}{m_{in.total}} \quad (8)$$

Siseneva vee tihedus $\rho_{w.in}$ - [kg/m³]

$$\rho_{w.in} = \frac{\sum(m_i \cdot \rho_i)}{m_{in.total}} \quad (9)$$

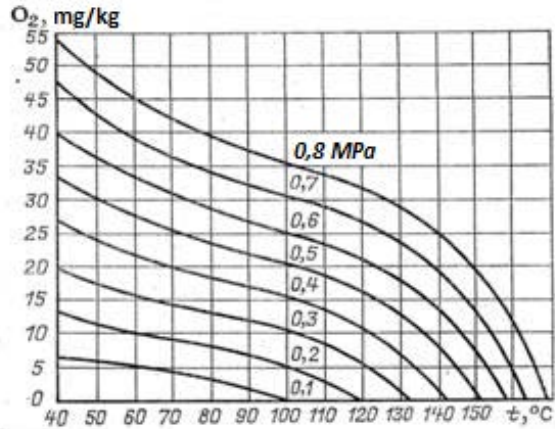
Siseneva vee entalpia $h_{w.in}$ - [kJ/kg]

$$h_{w.in} = \frac{\sum(m_i \cdot h_i)}{m_{in.total}} \quad (10)$$

Pärast voode segunemist eripihusti kaudu toimub vee pihustamine ülemise sektsiooni ülemisele taldrikule. Veepihustusseadmed tagavad vee segunemist. Pihusteid kinnitatakse vahetult kollektori muhvidele, mis lihtsustab nende tehnilise revisiooni ja remondi ilma „mittekeevate“ voode torustiku demonteerimiseta. Veejaotusseadmest ülespool asub piiskniiskuse koos heitauruga ära viimise tõkestav raimakilp.

3.3 Siseneva vee hapniku kontsentratsioon

Hapniku lõppsisalduse arvutuse jaoks on vaja teada kui palju hapniku on siseneva vees. Joonisel 3.1. on toodud hapnikusisaldus vastavalt vee temperatuurile. Joonisel on näha, et mida kõrgem temperatuur seda vähem hapniku osa vees ning sellega on efektiivsem deaereerimis protsess.



Joonis 3.1. Hapnikusalduse sisenevees viite [4]

Mõnikord enne arvutamise algust puudub informatsioon hapniku algkontsentratsiooni puhul. Antud juhul soovitatakse kasutada valemit:

$$O_{2.w.in} = (0,21 \cdot P_{w.in}) \cdot [1,3 \cdot e^{1700 \cdot \frac{1}{\tau_{w.in}} - \frac{1}{\tau_{25}}} \cdot M_{O_2}] \quad (11)$$

kus

$O_{2.w.in}$ - hapnikusaldus sisenevas vees [mg/kg]

$P_{w.in}$ – vee rõhk [P]

$\tau_{w.in}$ – siseneva vee temperatuur [°C]

τ_{25} – ümbritseva õhu temperatuur [°C]

M_{O_2} – hapniku molaarmass 32 [g/mol]

3.4. Soojusbilanss

Soojusbilanss on algoritmi üks tähtsamatest koostisosadest tänu millele leitakse protsessi kulgemiseks vajaliku soojuse hulka. Lisas 2 on esitatud plokk-skeem.

Soojusbilanssi koostatakse deaereerimiseks hädavajaliku auru kulu määramiseks. Auruhulk on garantiiväärtus ning seda edastatakse kliendile. Juhul, kui klient näitas deaereerimiseks ära viitava auru hulga, siis antud väärtuse kontrollitakse ning vastuolu korral tuleb klienti informeerida.

Energia paigaldise soojesskeemist sõltuvalt deaeratorisse sisestatakse üht või teist auru- ja veevoolude hulka. Soojusbilansid peavad olema vaadeldud tehnilises ülesandes esitatud deaeraatori töörežiimide jaoks.

Deaeraatori soojusbilansi võrrandi üldkuju kirjutatakse kui deaeraatori sisenevate ja väljuvate soojusvoode võrdsus.

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (12)$$

kus

Q_1 – siseneva auruga soojusvool [kJ/s]

Q_2 - väljuva deaereeritud veega soojusvool [kJ/s]

Q_3 - väljuva heitauruga soojusvool [kJ/s]

Q_4 - soojuskadu läbi isolatsiooni [kJ/s]

Auru soojuse hulka saab leida järgmise valemi järgi:

$$Q_1 = m_s h_s \quad (13)$$

kus

h_s – auru entalpia [kJ/kg]

m_s – auru kulu [kg/s]

Soojus, mis on vaja töötemperatuuri saavutamiseks veega:

$$Q_2 = m_{w,dea}(h_2 - h_1) \quad (14)$$

kus

$m_{w,dea}$ – deaereeritud vee kulu [kg/s]

h_2 – vee entalpia tööruhu juures [kJ/kg]

h_1 – segamis vee entalpia [kJ/kg]

Heitauruga väljaviidud soojushulk Q_3 on väga väike ning saab olla arvatud vaid pärast joasektsiooni arvutuse lõpu. Tavaliselt selle väärtuse võib eirata ning vajadusel teha korduva arvutuse pärast esimese estimateerimise.

Mahuti isolerimine, isolatsiooni paksuse arvutus, ning ka isoleerimistööd tavaliselt tehakse sihtobjektile vahetult kliendi poolt. Sellel põhjusel on isolatsiooni arvutus raskendatud isolatsioonist andmete puudumise tõttu. Igal juhul, isolatsiooni kasutamise puhul, soojuskadude väärtused on samuti väikesed ning neid saab eirata arvutamise lihtsustamiseks

Kõikide lihtsustamiste pärast valemi saab kirja panna järgnevalt:

$$Q_1 = Q_2$$

Aurukulu deaereerimisseadme tarbeks määratakse võrrandiga:

$$w_s = \frac{Q_1 - Q_2}{h_s - h_{w.dea}} \quad (15)$$

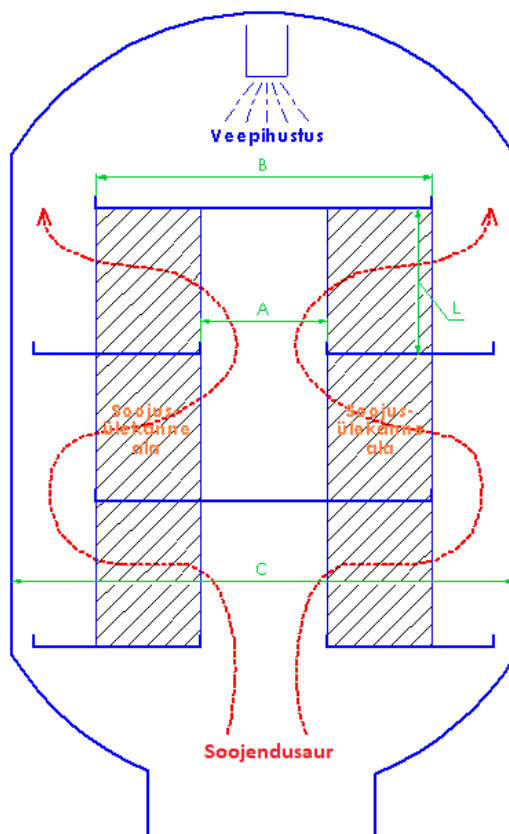
kus

h_s – auru entalpia [kJ/kg]

$h_{w.dea}$ – deaereeritud vee entalpia [kJ/kg]

3.5. Kolonni suurused

Tänapäeval kasutusel erinevaid kolonni tüübid. Ettevõttes Estanc AS ning antud uurimistöös vaadatakse perforeeritud taldriktüüpi deaeraatorid. Deaereerimis kolonn on näidatud joonisel 3.2. Kolonni suurused sõltuvad hüdrodünaamilist arvutustest.



Joonis 3.2. Deaeraatori kolonn

Taldriku välisläbimõõt B, on piiratud seinaga mille soovitud kõrgus on 30 kuni 100 mm. Suurus A on taldriku väike diameeter auru voolumise jaoks. Ava A ka piiratud sama seinaga. Allikates [6],[7] taldriku sein kõrgus lubatud üle 100 mm. Estanc-i pikaajaline kogemus näitab, et tavalise tööolukorral veetase taldrikute peal ei ületa 20 mm. Tavaliselt enamus taldrikud on varustatud sein kõrgusega 30-50 mm.

Hüdrostaatiline veetase taldrikus, saab arvutada vastavalt võrrandile:

$$H_{hs} = \frac{1}{2g} \left(\frac{m_w V v_w}{3600 * 0,785 d_a^2 n \mu_a a_1} \right)^2 \quad (16)$$

kus:

H_{hs} – hüdrostaatiline veetase [m]

g – raskuskiirendus [m/s²]

m_w – vee kulu [kg/s]

v_w – vee erimaht [m³/kg]

d_h – taldriku ava diameeter [m]

n – avade arv [tk.]

μ_a - dünaamiline viskoossuse tegur [N/m²]

α_1 – tegur, mis arvestab mõju veeliikumist taldriku peal.

Suurus C on deaeraatori kolonni siseläbimõõt. Mõõdud A ja C-B moodustavad auru liikumise ristlõige pindala. Erinevad kirjandused soovivad auru kiirus vahemikus 1-3 m/s. Estanc-i kogemus näitas, et kõike optimaalne kiirus antud tsoonides soovitav võtta 1,5-2 m/s. Suure kiiruse korral tekib vee äraanne oht ning vee maht võib väljendada koos heitauruga läbi ventilatsioon ühendused. Püsiv ja muutumatu töö jaoks soovitatakse kasutada sama auru kiirus iga kolonni ristlõikes (A ja C-B).

Taldrikute samm on näidatud suurusega L. „PTM“ soovib taldriku vahel kõrgust 350-500 mm ja suurte deaeraatorite puhul 800-900 mm. Kahjuks antud samm (800-900 mm) teeb kolonni liiga mahukaks ja ei leidnud kasutamist praktiliselt. Tavaliselt taldrikute vahesamm soovitatakse 150-400mm. Auru kiirus taldrikute vahel ei pea ületama 2 m/s.

Ideaalingimuste juures auru kiirus iga ristlõikes (A, C-B ja L) peab olema võrdne, kuid praktikas see võib suurendada taldrikute arvu. Mõnikord, et vähendada kolonni kõrgust on parem kasutada suuremat taldriku sammu ning seega vähendada auru kiirust ning suurendada joa kõrgust.

Taldriku perforatsioonid ava läbimõõd d_h moodustab joa läbimõõtu, mida tuleb võtta 5-8 mm vahemikust. Samm avade vahel peab olema vahemikus 18-30 mm. Avade arv sõltub joa hüdrodünaamilisest arvutustest ning arvutatakse joa kiiruse abil.

$$w_h = \alpha_1 m_h \sqrt{2gH_{gs}} \quad (17)$$

kus

w_h – joa kiirus taldrikute vahel [m/s]

m_h – vee kulu [kg/s]

α_1 – tegur, mis arvestab mõju veeliikumist taldriku peal.

H_{gs} - hüdrostaatiline veetase [m]

Tegur m_h saab võtta 0,75 kui, avade läbimõõt on 5-8 mm ja taldriku paksus on 4-6 mm. Praktiliste arvutuste korral tegur α_1 võib võtta 0,9. [6]

Veetase tõuse vältimiseks taldrikute peal ja muutumatu tööprotsessi tagastamiseks tuleb kontrollida vee kiirust taldriku ava ristlõikes. Pikkajalise kogemuste põhjal ESTANC kasutab oma lubatud joa kiirused on 0,3 m/s.

Kolonni kõrguse leidmiseks on vaja arvutada, kui palju taldriku - N_t on vaja deaereerimis protsessi jaoks. Tuleb arvestada joa kõrgust ja vajaliku lisakõrgust ülemisest ja alumistest taldrikust. Kolonni kõrgus arvutada vastavalt valemile:

$$L_{dea} = L (N_t + 1,5) \quad (18)$$

kus

L_{dea} – kolonni pikkus [m]

L – veejoa pikkus [m]

N_t – taldriku arv (tk)

Kolonni läbimõõt sõltub taldriku suurusel, mis omakorda piiratud taldriku avade arvuga. Avade arv on arvutatud väärtus.

3.6. Jaotustsooni arvutuse algoritm

Joatsoon on see koht, kus toimub seadme põhiprotsess, ehk hapniku termiline desorptsioon veest. Arvutuse läbiviimise eesmärk on leida vaheruumide (nn „taldrikute“) arv deaeraatoris, mis on vajalik deaereeritud vee nõutava kvaliteedi taseme tagamiseks. Lähteandmed hapniku desorptsiooni arvutamiseks on õhu algne ja lõplik sisaldus deaereeritud vees ning vee ja auru arvestuslikud näitajad.

Taldrikute arvu arvutatakse kasutades järjestiku aproksimatsiooni meetodit seni, kuni saadakse vajalikku hapniku jääksisaldust toiteveemahuti väljumis vees.

Juhul, kui deaeraatoris kasutatakse algasteks kaheastmelise vee deaeraatsiooni protsessis (joa-barbotaaži deaerator), taldrikute arv võiks olla vähendatud. Käesolevas töös barbotaaži mõju hapniku desorptsioonile ei võeta arvele, kuid esitatakse barbotaaži hüdrodünaamiline arvutus. Barbotaaži mõju deaeraatsiooni intensiivsusele on tulevaste uuringute teema, mis on kirjeldatud peatükis 4.1.

Jaotsooni arvutamise algoritmi tegemiseks otsustati määrata eelnevalt vajalik arvutustaldrikute arv. Praktikas, tavaliselt taldrikute arv ei ületa 6 tükki, võttes arvesse ka viimase taldriku deaereeritud vee kogumiseks. Seega algoritm seisneb hapniku kontsentratsiooni arvutamises kogu 6 taldriku peal. Taldrikute arv, mis on tegelikult nõutav vajaliku hapnikusalduse saavutamiseks, valitakse kontsentratsiooni arvutuse kontrollimisel nõutava kontsentratsiooniga. Niipea kui $O_{2,i} \leq O_{2,req}$ tingimus täidetakse taldriku peal, lõpetatakse arvutust ning saadud taldrikute arvu kasutatakse edasiseks arvutusteks.

3.6.1 Jaotsooni arvutus „PTM“ meetoditega

Valemi vastavalt (2) määratakse hapniku kontsentratsioon esimeses tsoonis alumisel taldrikul. Enne hapniku desorptsiooniprotsessi arvutamise, määratakse auru kogus, mis kondenseeritud antud jaotsoonis:

$$m_{cond,i} = \frac{\sum_{i=1} [m_{w,in} \cdot (h_{w,out} - h_{w,in})]}{(h_{s,in} - h_{w,out})} \quad (19)$$

kus

$m_{w,in}$ – veekulu üle taldriku vahel [kg/s]

$h_{w,out}$ – väljuva vee entalpia [kJ/kg]

$h_{w,in}$ – siseneva vee entalpia [kJ/kg]

$h_{s,in}$ – siseneva auru entalpia [kJ/kg]

Valemi (19) rakendamiseks tähtis teada temperatuuri jaotsooni alguses ja lõpus. Deaeratsiooni kolonnides läheb auru vool läbi pihustuskiire ümber põikvoolu. Kui töö rõhk on suurem kui atmosfäärirõhk, siis PTM meetod puhul soovitatakse kasutada valemit:

$$\ln \frac{\tau_{sat} - \tau_{in}}{\tau_{sat} - \tau_{out}} = C_A * \frac{L}{d_h^{0,7}} * W_j^{-0,3} * W_s^{0,3} \quad (20)$$

või

$$\tau_{i,out} = \tau_{sat} - \frac{\tau_{sat} - \tau_{w,in}}{10^{(C_A \frac{L}{d_h^{0,7}} W_j^{-0,3} W_L^{0,3})}} \quad (21)$$

kus

C_A – tegur, mis on määratud vastavalt töö rõhule (joonis 3.3).

τ_{sat} – küllastus temperatuur, mis on määratud P_{dea} [°C]

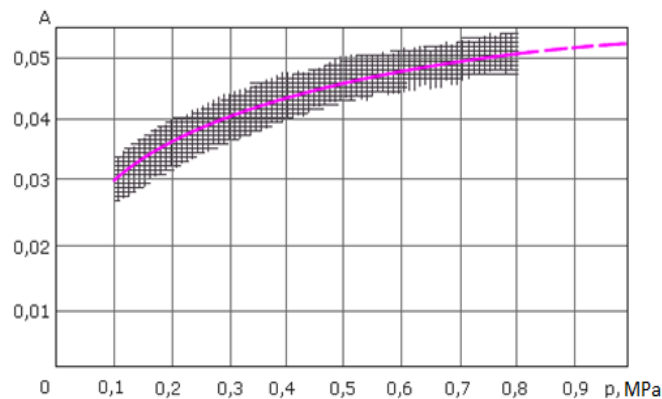
τ_{in} τ_{out} – vee temperatuur alguses ja lõpus [°C]

L – joa pikkus [m]

d_h – perforeerimis ava diameeter [m]

w_j – vee keskmine kiirus väljumisavas [m/s]

w_s – auru keskmine kiirus veejoa kimpus [m/s]



Joonis 3.3. A teguri määramiskõver [6]

Töös [3] oli mainitud M.P. Belousovi kriteeriaalne võrrand. Võrrand on töötatud välja auru põikvoolu korral veejoa kimpus:

$$\lg \frac{\tau_{sat} - \tau_{in}}{\tau_{sat} - \tau_{out}} = 0,018 \frac{L}{d} Lap^{0,15} Fr^{-0,15} Pr^{-0,4} \quad (22)$$

Valem on rakendatav ka lahustatud hapnikuga küllastamata vee puhul, ehk juhul, kui vees hapniku kontsentratsioon on tasakaalu kontsentratsioonist väiksem antud temperatuuri ja rõhu juures. Valemi kasutamiseks peavad olema täidetud järgmised nõuded: jugade pikkusel 180 kuni 550 mm auru rõhk kolonnis peab olema 1,5 kuni 8,0 kgs/cm²; taldriku avade läbimõõd peab olema kuni 6 mm; veevoolu kiirus taldriku avades 0,4 kuni 1,2 m/s. Peale selle suurus ($\rho_s W_s^2$) ei pea ületama järgmisi väärtusi: 30 Pa jugade pikkusel 180 mm; 6 Pa jugade pikkusel 325 mm; 2 Pa jugade pikkusel 475 mm.

Antud valem pole leidnud kasutamist algoritmis, kuid autor jätkab uurimistööd selle võrrandi kasutamise kohta.

3.7. Heitauru arvutus

Heitaur on deaeraatorist eemaldamisele kuuluv veest eraldunud gaaside ja väikses koguses auru segu. Enimlevinud konstruktsioonidest deaeraatorite kulu (tootlikkuse suhtes auru järgi) normaal töö jaoks peab olema 1-2 kg/t kuid see pole limiteeritud. Suurtes paigaldistes töötükli soojuskadude tekkimise vältimiseks heitauru kondenseeritakse. Kui antud eesmärgi tarbeks kasutatava heitauru jahutit paigaldatakse deaeraatori väljundveel, siis see vesi peab olema deaeraatori küllastustemperatuurist piisavalt jahedam [12-13].

Joatsooni arvutuse pärast, heitauru kulu saab arvutada valemiga:

$$m_{vent} = m_{s.in} - \sum_{i=1}^{N_t} m_i \quad (23)$$

kus

m_{vent} – heitauru kulu [kg/s]

$m_{s.in}$ – siseneva auru kulu [kg/s]

3.8. Ühenduste suuruse arvutamine

Ühenduste suurus on piiratud voolamiskiirusega. Voolamiskiirus omakord sõltub aine tihedusest [kg/m³] ja vooluhulgast [kg/s]. Erinevad standardid määravad erinevad voolamiskiirused, näiteks „PTM“ annab järgmised andmed:

- Lubatud aurukiirus ühendustest
 - Kui P=1,2 kg/m³, siis 40-70 m/s
 - Kui P=7-10 kg/m³, siis 30-40 m/s
- Lubatud veekiirus ühendustest 1,5-2,5 m/s

Lubatud kiirused HEI-standardi järgi on järgmised:

- Sissetuleva voolu kohta – 1,8-2,4 m/s
- Lubatud aurukiirus ühendustest – 38-53 m/s
- Pumpadele minev vool 1 – 1,5 m/s

Pikkajalise kogemuste põhjal ESTANC kasutab oma lubatud kiirused:

- Lubatud veekiirus kõikidel olukordades on 1-1,8 m/s
- Lubatud aurukiirus on 20-40 m/s

Antud kiirused vähendavad ühenduste erosiooni võimalust ning vältivad turbulentsvoolu.

Toru ühenduste läbimõit on võimalik arvutada järgnevalt:

$$d_i = \sqrt{\frac{m_i}{\rho_i w_i} * 4} \quad (24)$$

kus

d_i – diameeter [m]

m_i – vooluhulk [kg/s]

ρ_i – tihedus [kg/m³]

w_i – voolukiirus [m/s]

Pärast ristlõige pindala arvutamist saab valida lähedam suurem nominaal diameeter DN.

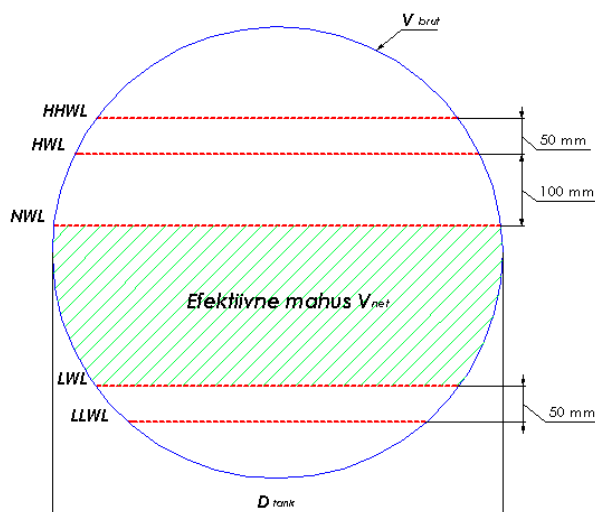
3.9. Toiteveemahuti suuruse arvutamine

Joonisel 3.4. on kujutatud mahuti täitmise taset. Toiteveemahuti efektiivne maht sõltub toiteveemahuti süsteemi tootlikkusest ning asub NWL ja LVL veetasemete vahel (Joonis 3.4). Toiteveemahuti suurus sõltub esiteks kliendi esitatud andmetest ka.

LLWL tase on kõige minimaalne vee tase. LWL tase paikneb 50 mm LLWL üles ning see on lisamaht automaatika reageerimise jaoks. Alumise tase kontrollimine on tähtsam ülesanne, kuna aur võib rikkuda mahuti konstruktsiooni, torustikku ja pumpa. LLWL veetase samuti sõltub aurutorustiku suurustest, näiteks alumise barboteerimis konstruktsioonist või perforeerimis torudest.

HHWL on kõige kõrgem veetase. Lisaks HHWL tase ülevalt peab olema piisav ruumi auru liikumise ja mahuti ventileerimise jaoks .

NWL veetase on nominaal toiteveemahuti veetase. Varamahu tagamiseks on ettenähtud HWL veetase, mis asub 100 mm kõrgem kui NWL tase. HWL ja HHWL on tavaliselt 50 mm vahe et samuti tagada piisav aega automaatika reageerimiseks.



Joonis 3.4. Mahuti täitmise taset

Juhul kui kõik veetased on leitud, siis saab arvutada täismaht ja toiteveemahuti gabariidid. Kui mahuti gabariidid on etteantud algusest, tuleb kontrollida vastavalt veetase arvutamisele. Kontrollimiskäik on kajastatud algoritmis.

Toiteveemahuti on jagatud mitmeks tasandiks:

HHWL (High High Water Level) - on maksimaalne lubatud veetase mahutis, kui veetase on sellest joonest üle, avaneb kaitseklapp ja vesi voolab läbi.

HWL (High Water Level) - on maksimaalne lubatud veetase mahutis.

NWL (Normal Water Level) - on normaalne lubatud veetase mahutis. Seda veetaset säilitatakse kogu deaeraatori töö protsessi jooksul.

LWL (Low Water Level) - on minimaalne lubatud veetase mahutis, automaatika lülitab välja siseneva vee pumpasid kui veetase on saavutanud.

LLWL (Low Low Water Level) - on minimaalne lubatud veetase mahutis. Barbotaaži osa paikneb selle taseme alt. Kui veetase läheb see osa all, deaeraator ei saa käivitada.

V_{net} – on maht, mis kasutatakse süsteemis. Sageli on deaeraator selle mahu alusel projekteeritud.

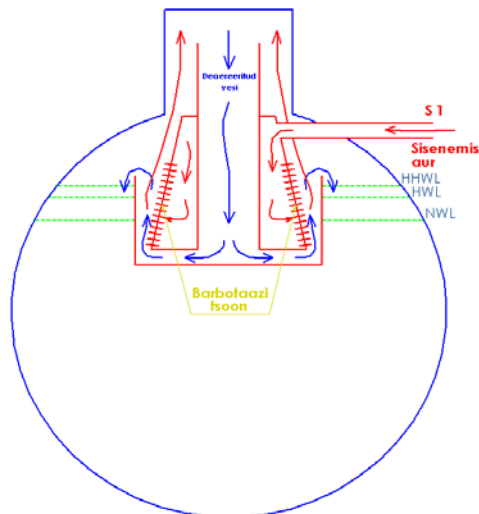
D_{tank} – on akumulatsioonipaagi läbimõõt.

V_{brut} – on akumulatsioonipaagi maksimaalne maht.

3.10. Barbotaaži hüdrodünaamiline arvutus

Barbotaaži joonisel 3.4. on auru läbijuhtimine vedelikust väikeste mullidena segamiseks, absorbeerimiseks. Enamikes deaeraatorites barboteerimine on deaereerimise lõppfaas. Barbotaaži konstruktsioon võib olla väga erinev ning sõltub hüdrodünaamilistest arvutustest. Antud uurimisprojekti on käsitletud kaks barbotaaži konstruktsiooni:

Perforeeritud torud (steam rake). Soovitud perforeerimise ava läbimõõt on 4-6 mm. Perforeerimis toru konstruktsioon kasutatakse terve toiteveemahu barboteerimiseks.



Joonis 3.4. Barbotaaž

Perforeeritud koonus/leht (after cooking device). Soovitud perforeerimise ava läbimõõt on 6-10 mm. Perforeeritud koonus asub deaeraatori pea alt ning barboteerib siseneva vee ainult lokaalselt.

Perforeeritud toru puudus on suure LLWL mahu tekkimine. Kuna toru paikneb mahuti altpoolt, ülemine veemaht võib jätta vähem barboteeritud. Samas kuna toru paikneb toiteveemahuti pikkuselt, barboteerimise protsess toimub kauem.

Perforeeritud koonuse juhul barboteerimise protsess toimub lokaalselt ning sellega saab töödelda kõik läbiminev toiteveemaht. Selle konstruktsiooni puudus on see, et kõik toiteveemaht osaleb barboteerimis protsessis vähe aega. Antud juhul on oht, et suure siseneva vee kiiruse korral et tekitab piisavalt barboteerimist.

Kuna barboteerimis konstruktsioonid omandavad oma puudused ja eelised, otsustatud mitte käsitleda antud lõputöös barboteerimis protsessi hapniku eraldamise arvutustes. Barboteerimis konstruktsiooni tuleb kasutada suure tootlikkuse või koormuse juhul.

Hüdrodünaamiline arvutus sõltub auru ja vee parameetritest. Auru kiirus peab olema lubatud piirides 20-40 m/s, et vältida barboteerimis lehe või toru üleujutust. Auru kiirus ei pea olema liiga suur, et vältida torustiku vibratsiooni ja järjest purustust. Nagu selle töö eestpoolt oli mainitud, barboteerimis ava läbimõõd soovitav võtta 4-6 mm torude puhul ja 6-10 mm koonuse puhul.

Teatud auru kiirust, vooluhulgast ja ava kujust saab arvutada avade kogus vastavalt võrrandile:

$$m_{s.req} = \frac{m_{w.req}}{N_{h.b}} * \frac{V_{s.in}}{S_{h.b}} \quad (25)$$

kus

$N_{h.b}$ – ava arv barbotaaži jaoks [tk]

$S_{h.b}$ – ühe ava ristlõikepindala [m²]

$V_{s.in}$ – auru maht kilogrammi kohta [m³]

Teatud ühenduste suurus, saab arvutada vastavalt võrrandi

$$N_{SD} = \frac{m_s \cdot v_s}{w_s \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}} \quad (26)$$

m_s – vooluhulk [kg/s]

ρ – tihedus [kg/m³]

w_s – voolukiirus [m/s]

v_s – auru erimaht [m³/kg]

3.11. Eelsoojendustoru hüdrodünaamiline arvutus.

Eelsoojendus toru arvutamise puhul kehtivad samad nõuded, mis oli mainitud peatükis 3.7. ja 3.9. ning konstruktsiooni kirjeldus on 1.2. Lubatud aurukiirus soovitatav võtta vahemikus 20-40 m/s. Perforeeritud toru ava suurus soovitatav võtta vahemikus 4-8 mm.

Hüdrodünaamiline arvutus kõigepealt sõltub auru parameetritest ehk auru kogus, temperatuur ja rõhk. Eesmärk on saavutada ohutu deaeraatori käivitus ning soojendada siseneva vee maht kuni külastustemperatuurini. Tavaliselt deaeraatori käivitus toimub atmosfääri rõhu juures. Selle juhul külastustemperatuur võetakse 102-105 °C. Üldiselt kasutatakse kaks käitumisviisi: kiirkäivitus ja pikaajaline käivitus. Mõlematel juhul, vastavalt ESTANCI kogemustele, tuleb hoida temperatuuritõus mitte rohkem kui 2,3 °C/min, et vältida vibratsiooni ja sisse elemendi rikkumist erosiooni puhul. Samal juhul „PTM“ soovitab 30-40 min., et saavutada 105 °C. Kui teatav soojendamise veemaht ja aeg saab leida kui palju auru on vaja 20°C - > 105 °C soojendamiseks. Pärast auru koguse leidmist on võimalik leida toru nominaal diameeter, mis tuleb arvestada LLWL veetase leidmiseks. Antud juhul vastaval algoritmi võib tekkida vajadus uuesti korraldada veetasemete arvutus.

3.12. Deaeraatori käivitamise põhimõte

Enne deaeraatori kasutamist või uuesti kasutamist tuleb jälgida järgmist:

- Veenduge, et kogu barbotaaži toru on veega täidetud ja õhk ei jääks barbotaaži toru peale. See torujuhe peab olema hoolikalt täidetud, et takistada barbotaaži toru on kahjustatud vee haamriga.

Teostatakse auru vabanemise arvutamist vastavalt valemile:

$$m_{s.start-up} = \frac{V_{start-up} \cdot \Delta\tau \cdot D}{\frac{\Delta h}{t}} \quad (27)$$

kus

$V_{start-up}$ – algkäivituse vee maht [m³]

$\Delta\tau$ – temperatuurivahe [°C]

D – toiteveemahuti diameeter [m]

Δh – entalpiate vahe [kJ/kg]

t – aeg [s]

Kiirkäivitus

Kiirkäivituse puhul on piisav võtta toitevee maht kuni LWL veetasemele. Pärast selle tase saavutamist käivitatakse eelsoojendamine, mille eesmärk on saavutada külastustemperatuuri. Kuna õige temperatuur on saavutanud saab panna töösse sisselaskev kondensaad ning alumise eelsoojendus ventiili pannakse kinni. Paar minuti pärast kondensaadi käivitamist, kui barbotaaži leht on täidetud, avatakse peaauru ventiil ning aur läheb barboteerimiseks ning pärast joavaheruumi deaereerimiseks. Pärast peaauru ventiili avamist, pannakse kinni käivitus õhuklappi ning jääb töötada ainult pidev õhuklapp. Samas toimub rõhu tõus kuni töö rõhuni. Kui NWL veetase on saavutanud saab käivitada siseneva vee pumbad.

Pikkajaline käivitus

Pikaajalise käivituse puhul toimub sama tööpõhimõtte nagu kiirkäivitus puhul vaid erinevustega, et alguses LWL asemel tuleb saavutada NWL veetase ning eelsoojendus aeg on pikem.

4. ARVUTAMISE NÄIDE ARENDATUD MEETODI ABIL

Algoritmi kontrollimiseks oli valitud töötav deaeraator, mis asub Tallinna Elektri jaamas. Deaeraator oli valmistatud Estanc ASi poolt 2015 aastal ja protsessi projekteerimine VESI-PAULI OY soome ettevõtte poolt. Vesi-Pauli Oy ettevõtte tegutseb alatest 1987 a. ning omab väga suurt kogemustaldriktüüpi deaeraatori projekteerimises. [14]

Antud arvutuse eesmärk on kontrollida Estanc AS arvutusetulemused ja algoritmi ehitus ning võrrelda tulemused Vesi-Pauli konstruktsiooniga. Arvutustes oli kontrollitud tegelik konstruktsioon.

Input data			
Index	Equation	Designation Unit	Result
Condensate 1	Customer data	T [°C] P [Bar(a)] m [kg/s]	70 5 19,4
Make-up water	Customer data	T [°C] P [Bar(a)] m [kg/s]	15 5 0,694
Steam	Customer data	T [°C] P [Bar(a)] m [kg/s]	200 5 2,33
Outlet feedwater	Customer data	T [°C] P [Bar(a)] m [kg/s]	131,2 2,8 22,46
Tank operating capacity	Customer data	V [m ³]	100

Unknown input data			
Index	Formula	Measure	Answer
O ₂ _{in}	$O_{2.w.in} = (0,21 \cdot P_{w.in}) \cdot [1,3 \cdot e^{1700 \cdot \frac{1}{T_{w.in}} - \frac{1}{T_{25}}}] \cdot M_{O_2}$	[mg/kg]	21,26
Start-up		T[°C]	15
		T[°C]	104,8
		[min]	60
Tank installation dimensions		L [mm]	12000
		OD [mm]	3600

Module 1. Balance			
Index	Formula	Measure	Answer
Mixing of incoming fluids	$m_{w.in} = \sum (m_1 + m_2 + m_3 + m_i)$	m [kg/s]	20,134
	$T_{w.in} = \frac{\sum (m_i \cdot T_i)}{m_{in.total}}$	T [°C]	68,1
	$P_{w.in} = \frac{\sum (m_i \cdot P_i)}{m_{in.total}}$	P [Bar(g)]	5,00
	$\rho_{w.in} = \frac{\sum (m_i \cdot \rho_i)}{m_{in.total}}$	ρ [kg/m ³]	979,0
	$h_{w.in} = \frac{\sum (m_i \cdot h_i)}{m_{in.total}}$	h' [kJ/kg]	285,1
Steam density	ρ (m [kg/s], t [°C], P [bar(a)])	ρ [kg/m ³]	2,4
Steam enthalpy	h" (m [kg/s], t [°C], P [bar(a)])	h" [kJ/kg]	2855,9
Specific volume	V (m [kg/s], t [°C], P [bar(a)])	V [m ³ /kg]	0,4250
Required energy	$Q_{req} = m_{w.in} \cdot (h'_{out} - h'_{in})$	Q [kW]	5363
Steam required	$m_{s.req} = Q_{req} / \Delta h$	[kg/s]	2,33

Module 2. Tray calculation			
Tray dimensions			
Index	Formula/Recommended	Measure	Answer
Deaerator ID		C [mm]	1800
Diameter of the opening		A [mm]	850
Jet	Recommended 100-400	L [mm]	450
Tray ID		B [mm]	1510
The hole ID	Recommended 5-8 mm	d[mm]	6
The hole PITCH	Recommended 18-30 mm	Pitch [mm]	23
Number of holes		[tk]	2300
Board height	Recommended 50-160 mm	[mm]	100
Height of water on the tray board	$H_{hs} = \frac{1}{2g} \left(\frac{m_{w.in} V_w}{3600 * 0,785 d_a^2 n \mu_a a_1} \right)^2$	[mm]	9
Total length of deaerator TL-TL	$L_{dea} = L (N_t + 1,5)$	[mm]	2000
Steam/water flow speed in deaerator			
Section A	Recommended 1.5-2 m/s	w _A [m/s]	1,75
Section L		w _L [m/s]	0,82
Section C-B		w _{C-B} [m/s]	1,4
Water velocity of jet	$w_j = a_1 m_{w.in} \sqrt{2gH_{gs}}$ Recommended < 0,3 m/s	w _j [m/s]	0,285
Water velocity in holes	$w_h = \frac{m_{w.in} \cdot 4 \cdot N_h}{\rho_{w.in} \cdot d_h^2 \cdot \pi}$ Recommended < 0,3 m/s	w _h [m/s]	0,316

Module 3. Oxygen stripping according to „PTM“ [6]				
Index	Formula	Measure	t.s.	Answer
Water temperature on the tray	$\ln \frac{T_{sat} - T_{in}}{T_{sat} - T_{out}} = C_B * \frac{L}{d_h^{0,7}} * w_j^{-0,3} * w_s^{0,3}$ / $T_{i.out} = T_{sat} - \frac{T_{sat} - T_{w.in}}{10^{(C_A \cdot \frac{L}{d_h^{0,7}} \cdot w_j^{-0,3} \cdot w_L^{0,3})}}$	T [°C]	1	124
			2	130,4
			3	131,1
			4	131,2
			5	131,2
			6	131,2
Water enthalpy on the tray	h" (t [°C], P [bar(a)])	h' [kJ/kg]	1	520,92
			2	547,99
			3	551,07
			4	551,42
			5	551,46
			6	551,46
Condensated steam mass flow	$m_{cond.i} = \frac{\sum_{i=1} [m_{w.in} \cdot (h_{i.out} - h_{i.in})]}{(h_{s.in} - h_{i.out})}$	m [kg/s]	0-1	2,0336
			1-2	0,2361
			2-3	0,0269
			3-4	0,0031
			4-5	0,0003
			5-6	0,0000
O2 in water	$\ln \frac{O2_{in}}{O2_{out}} = C_B \cdot \frac{L}{d_h^{0,7}} \cdot w_j^{-0,3} \cdot w_L^{0,3} \cdot \left(\frac{m_{cond.i}}{m_{w.in}}\right)^{-0,5}$	[mg/kg]	1	16,9651
			2	8,7522
			3	1,2325
			4	0,0037
			5	0,0000
			6	0,0000

Module 4. Vent			
Index	Formula	Measure	Answer
Vent flow	$m_{vent} = m_{s.dea} - \sum_{i=1}^N m_i$	m [kg/s]	0,0333

Module 5. Nozzle sizing				
Steam				
Index	Formula/Recommended	DN	Measure	Answer
Deaeration steam inlet S1	Recommended DN10-700, Recommended 20-40 m/s.	200	w [m/s]	29,57
Start-up heating steam inlet S2		100	w [m/s]	8,37
Vent nozzle N _{vent}		50	w [m/s]	6,86
Water				
Condensate 1 nozzle N1	$d_i = \sqrt{\frac{m_i}{\rho_i w_i} * 4}$ Recommended DN10-700, Recommended 1-1,8 m/s.	150	w [m/s]	1,04
Make-up water nozzle N _{Make-up}		100	w [m/s]	0,09
Feed water outlet nozzle N _{FW}		250	w [m/s]	0,46

Module 6. Volume calculation			
Index	Formula	Measure	Answer
LLWL		[m ³]	5,7
LWL		[m ³]	7,1
NWL		[m ³]	111,8
HWL		[m ³]	115,6
HHWL		[m ³]	117,4
Brutto	$V_{brutto} = (0,1 * (D_{tank} - 2s)^3) * 2 + \frac{(D_{tank} - 2s)^2 \pi}{4} \cdot L_{tank}$	[m ³]	130,6

Module 7. Start-up calculation			
Index	Formula/Recommended	Measure	Answer
Heating time	Recommended ≥ 60 min	t [min]	180
Start temperature		[°C]	15
End temperature		[°C]	104,8
Heating volume		[m ³]	50
Steam required for start-up	$m_{s.start-up} = \frac{V_{start-up} \cdot \Delta T \cdot C_p}{\Delta h \cdot t}$	[kg/s]	0,65
Heating rate	$\frac{\tau_{end} - \tau_{start}}{t_{heating}}$ Recommended < 2,3°C/min	[°C/min]	0,5

Module 8. Barbotáž			
Index	Formula/Recommended	Measure	Answer
Steam piping		DN	200
Hole diameter in sparging device	Recommended 4-6 mm.	d_h	4
Number of holes in sparging device		N_h	2230
Steam velocity in hole	$m_{s.req} = \frac{m_{w.req}}{N_{h.b}} * \frac{u_{s.in}}{S_{h.b}}$ Recommended 20-40 m/s.	w_s [m/s]	35,34
Steam velocity in piping	$m_{s.req} = \frac{m_{w.req}}{N_{h.b}} * \frac{u_{s.in}}{S_{h.b}}$ Recommended 20-40 m/s.	w_s [m/s]	29,57

Üldiselt antud töö arvutuse tulemused tulid võrdsed koos Vesi-Pauli tulemustega. Mõned erinevused võib põhjendada erinevatega arvutusmeetodiga ning kliendi erinõuetega.

Näiteks Vesi-Pauli deaeraatori konstruktsioonis oli kasutatud 450 mm taldrikute vahe. Estanci poolt soovitus on 100-400mm. Antud juhul 450 mm annab 4 taldriku vajadust kuid 400 mm juures juba 5 taldriku. Selline muudatus on otstarbekas kasutada ning teeb konstruktsiooni lihtsamaks.

Lisaks arvutuse käigus oli leitud, et vee kiirus avades on suurem soovitatud väärtust. Arvutuse tulemus on 0,316 m/s kuid soovitud kuni 0,3 m/s. Selline erinevus on väike ja ei mõjuta protsessile. Antud juhul suurem kiirus võib lubada.

Ühenduste arvutuse käigus oli leitud, et mõned ühendused on üledimensioneeritud ning vee kiirus oli madalam kui 1m/s. Arvutuslik kiirus külmavee torustikus (make-up water) on 0,09 m/s. Kuna külmavee torustik on tehtud happekindel roostevaba materjalidest, siis selline kiirus ei tekki korrosiooni ning on võimalik lubada. Toitevee väljumis ühenduse (Feed water outlet nozzle) arvutuslik kiirus torudes on 0,46 m/s. Üledimensioneeritud toru võib põhjendada sellega, et lõppklient vajab suurem tootlikus süsteemis ning lühiajalised koormused võivad olla suurem kui arvutuslik parameetrid.

Näidis arvutuste eesmärk oli täiesti tehtud ning saanud tulemused vastavad projekteeritud konstruktsioonile ning valmistatud deaeraatorile.

4.1. Põhilised deaeraatori rikked ja nende kõrvaldamine

Deaeraatorite rikked ja kõrvaldamise lahendused on detailselt kirjeldatud töödes [6],[9],[15],[16] ja on toodud selles peatükis.

Proovi hapniku ja vaba süsihapegaasi kontsentratsiooni määramine toimub valesti. Sellisel juhul tuleb kontrollida:

- keemiliste analüüside teostamise õigsust, veevõtu proovide võtmise õigsust;
- vee temperatuuri, kulu ja õhumullide puudumise vees;
- proovijahuti torusüsteemi tihedust.

Märkimisväärselt kahanenud aurustamise kulu. Sellel juhul tuleb kontrollida:

- jahutusvee temperatuuri ja kulu aurustamise jahutile ning alandada selle temperatuuri või suurendada kulu.

Deaeraatorpaagi suunatud kondensaadid sisaldavad märkimisväärse hapniku ja vaba süsihapegaasi. Auru kulu deaeraatorisse on pudulik (keskmise veesoojenduse väärtus on deaeraatoris vajalikust suuruselt madalam).

Deaeraatoris on rõhk langenud. Sellisel juhul tuleb kontrollida:

- Toiteallika rõhu ning soojuskandja kulu piisavust;
- rõhuregulaatori töökorrasoleku (vajaduse korral tuleb üle minna käsijuhtimisele)
- Reguleerklapi läbilaskeristlõike piisavust (vajaduse korral klapp tuleb välja vahetada)

Deaeraatori rike:

- taldrikute avad on ummistatud, kortsumine, riknemine, katkemine, vale taldrikute paigaldus(olulise kallega);
- barbotaažiseadme rike ja teised. Deaeraator via tööst välja ning sooritada selle remonti ja puhastust.

Eraldiseisvate deaeraatorite termiline ja hüdrauliline ülekoormus nende paralleeltöö korral. On tarvis korraldada ühtlase koormuste jagamise töötavate deaeraatorite vahel.

Deaeraatori sisemise rõhu kõrgenemine ja kaitseseadme rakendumine võib olla põhjustatud rõhureguleerija rikke ning soojuskandja kulu järsu suurenemisega või deaereeritud vee kulu

vähenedamisega, või selle temperatuuri kõrgenedamisega. Sellistel juhtumitel tuleb üle minna rõhu kaug- või käsijuhtimisele, aga reguleerklapi rike korral tuleb kasutada sulgeriivi, mis asub soojuskandja edastusliinis. Rõhu alandamise võimatuse korral, eeldusel, et soojuskanda edastus deaeraatorisse on lõppenud, tuleb deaeraatorisse jahutusvoode kulu suurendada või alandada nende temperatuuri. Vastasel juhul deaeraator peab olema välja lülitatud.

Lubatud tasemest vee taseme kõrvalekaldumine üles või allapoole võib toimuda tasemeregulaatori korratuse tõttu. Sellisel juhul tuleb veetaseme kaug- või käsireguleerimisele üle minna. Veetaseme alanemine paagis on samuti võimalik sõreda või kahjustatud sulgarmatuuri oluliste lekete tõttu, torude uuriste ning katkete ja teiste põhjuse tõttu.

Häired deaeraatori töös normaalses hüdrodünaamilises režiimis viivad märkimisväärsete vibratsioonide ning hüdroloökide tekkimisele. Sellised nähtused ei ole lubatud deaeraatori eksploateerimisel, sest võivad viia deaeraatori tööelementide purunemiseni ja enneaegse eluea lõppu.

Sellised rikked võivad tekkida:

- Deaeraatori rike korral (deaeraatori tuleb peatada ja sooritada remonti)
- Deaeraatori hüdraulilise ning termilise ülekoormuste korral („lækastamise“ režiim); on tarvis kontrollida algvoode kulu deaeraatorisse ning deaeraatoris keskmise veesoojenduse väärtust.
- Deaeraatori vale töösse sisseviimise korral (deaeraatorit tuleb töösse viia juhendi rangelt järgides ilma hüdroloögideta).

Vaakumdeaeraatorites võivad hüdroloogid ilmuda samuti juhul, kui gaasiemaldusseade ei taga piisava vaakumi taseme või süsteemisse märkimisväärse õhu imemise tõttu sõrude kaudu.

4.2. Algoritmi täiendused

Tänapäeval Estanci arvutusprogrammis kasutatakse kaks hapniku desorptsiooni arvutusmeetodit - „PTM“ ja „ЦКТИ“. Algoritm on tehtud ainult „PTM“ meetodi alusel. Tulevikus plaanitakse lisada algoritmiss „ЦКТИ“. meetodit nagu alternatiivse arvutuse meetodit. Kogemuse põhjal saab öelda, et „ЦКТИ“ arvutuse tulemus näitab 1-2 taldrikut vähem, kui „PTM“ meetodi tulemus.

Nagu mainitud enne, kasutatud programmis puudub barbotaaži seadme soojusarvutus ja selle mõju hapniku desorbeerimisele.

Tulevikus plaanitakse lisada arvutusprogrammile ka lisa sisenevaid voolusid: kondensaati mittekeevad voolud, kus rõhu ja temperatuuri parameetrid on olulisem kõrgem kui deaeraatori tööparameetrid.

Algoritmi väljatöötamise jooksul on leitud vead LLWL ja HHWL tasemete arvutusel. Tulevikus on vaja kontrollida algoritmis määratud seoseid mitu näidise peal.

Algoritmi koostamisel on leitud ka hüdrodünaamiliste kadude puudused auru- ja veetsooni takistuse peale. Need arvutused tuleb lisada peaarvutusele, mis on ka autori tulevane ülesanne.

KOKKUVÕTE

Antud uurimistöös käsitletakse deaeraatorite konstruktsioonide tööpõhimõtted, arvutus meetodi ja algoritmi arendust. Algoritmi koostamine andis parema ülevaade arvutuse näitlikustamisele. Eriti oluline on arvutuse meetodi seletamine uuele töötaja puhul. Lisaks saab öelda, et algoritm on juhendmaterjal programmile.

Koostatud algoritm näitas, et kogu arvutuse saab jagada mooduliteks. Selline lahendus aitab lihtsustada arvutuskäiku ja programmi ehitust.

Algoritmi ehitus tõi välja programmi kitsaskohad ja uued arengu valdkonnad. Leiti, et veetaseme arvutusemeetod vajab korrigeerimist ning antud töös on kasutatud õiged valemid. Lisaks arvutus meetod oli kontrollitud Tallinna Elektri jaama paigaldatud seadmega mis oli valmistatud aastal 2015 Estanci poolt ning projekteeritud Vesi-Pauli Oy ettevõtte poolt. Arvutuse kontroll näitas et arvutuse meetod ja koostatud algoritm on kasutuskõlblik.

Lisaks uurimistöös oli kirjeldatud põhilised deaeraatori rikked ja võimalikud lahendused selle kõrvaldamine.

Uurimistööl ajal pandi kokku kõik tuleviku arengusuunad. Olemasolevat programmi tuleb täiendada barbotaaži arvutusega, lisada rõhukadude arvutus torustikus, rakendada uued arvutusmeetodid. Koos programmiga tuleb uuendada algoritmi.

Antud lõputööd jätkatakse Estanci sisemise arengu projektina. Lõputöö autor samuti jätkab uurimistööd, mis on seotud taldriku deaeraatoriga ning lisaks vee pihusti deaeraatori arendusega. Lõputöö eesmärk on täidetud täis mahus ning algoritm on võetud kasutamisele Estanc AS ettevõttes. Algoritm on koostatud exceli põhjal ning lisatud arvutus programmi kõrvale. See annab võimaluse tutvuda algoritmiga juba arvutuse käigus.

SUMMARY

This research is about deaerator, structural design principles, calculation method and algorithm development. The compilation of the algorithm gives a better overview of the demonstration of the calculation. It is especially important to explain the calculation method for a new employee. In addition, it can be said that the algorithm is a guide for the software.

Estanc currently uses software based on Excel and it is very complicated (too perplexed, formidable), with a complex computational process, because of this it needs to be updated. The compiled algorithm showed that the whole calculation can be divided into modules. This solution helps to simplify the computation and the construction of the program.

The construction of the algorithm revealed weaknesses and new areas of the software could be developed. It was found that the water level calculation method needs to be corrected and the correct formulas are demonstrated in this work. In addition, the calculation method was tested with equipment installed at the Vão cogeneration plant, which was manufactured in 2015 by Estanc and designed by Vesi-Pauli Oy. The calculation check showed that the calculation method and the algorithm compiled are usable.

In addition, the main deaerator functions, and possible approximations to eliminate it, were described in the research.

During the study all future developments were merged. The existing software should be supplemented with the bubbling calculation, needs to add the calculation of pressure loss in the pipeline, (and) apply new calculation methods. The algorithm can be updated using the software.

This graduation thesis will be continued as Estanc's internal development project. The author of the thesis also continues research related to a plate-type deaerator, as well as the development of a spray-type deaerator. The goal of the graduation thesis is fulfilled in full and the algorithm is currently in use in Estanc AS. The algorithm has been compiled based on excel and added to the calculation. This already provides an opportunity to get acquainted with the algorithm during the calculation.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] „A deaerator model“ [Artikkel]. Department of Energy Use and Generation University POLITEHNICA of Bucharest Splaiul Independentei 313, 060042 Bucuresti ROMANIA (inglise keeles).
- [2] Буров В.Д. и др. „Тепловые электрические станции“ – М.: МЭИ, 2009, 466 с. (vene keeles).
- [3] Ледуховский Г.В., Виноградов В.Н., Горшенин С.Д., Коротков А.А. Исследование технологических процессов атмосферной деаэрации воды / под общ. ред. Г.В. Ледуховского; ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2016. – 420 с. (vene keeles).
- [4] Рыжкин В.Я. „Тепловые электрические станции“ – М.: Энергоатомиздат, 1987, 328 с. (vene keeles).
- [5] „Deaerator“ [Pilt]. Available <https://en.wikipedia.org/wiki/Deaerator>
- [6] В.А. Пермяков, А.С. Гиммельберг, Г.М. Виханский, Ю.М. Шубников „Расчет и проектирование термических деаэраторов РТМ 108.030.21-78“, УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ указанием Министерства энергетического машиностроения от 02.02.78 № ПС-002/849 (vene keeles).
- [7] Оликер, И.И. Исследование работы термического деаэратора повышенного давления с барботажным устройством ЦКТИ / И.И. Оликер, В.А. Пермяков, Ю.Л. Тоц // Теплоэнергетика. – 1966. – № 12, (vene keeles).
- [8] K.V. Sharma, K.V. Suryanarayana, P.K. Sarma, M.M. Rahman, M.M. Noor, ja K. Kadirgama „Experimental investigations of oxygen stripping from feed water in a spray and tray type deaerator“, Universiti Malaysia Pahang, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, Volume 1, pp. 46-65, January-June 2010 (inglise keeles).

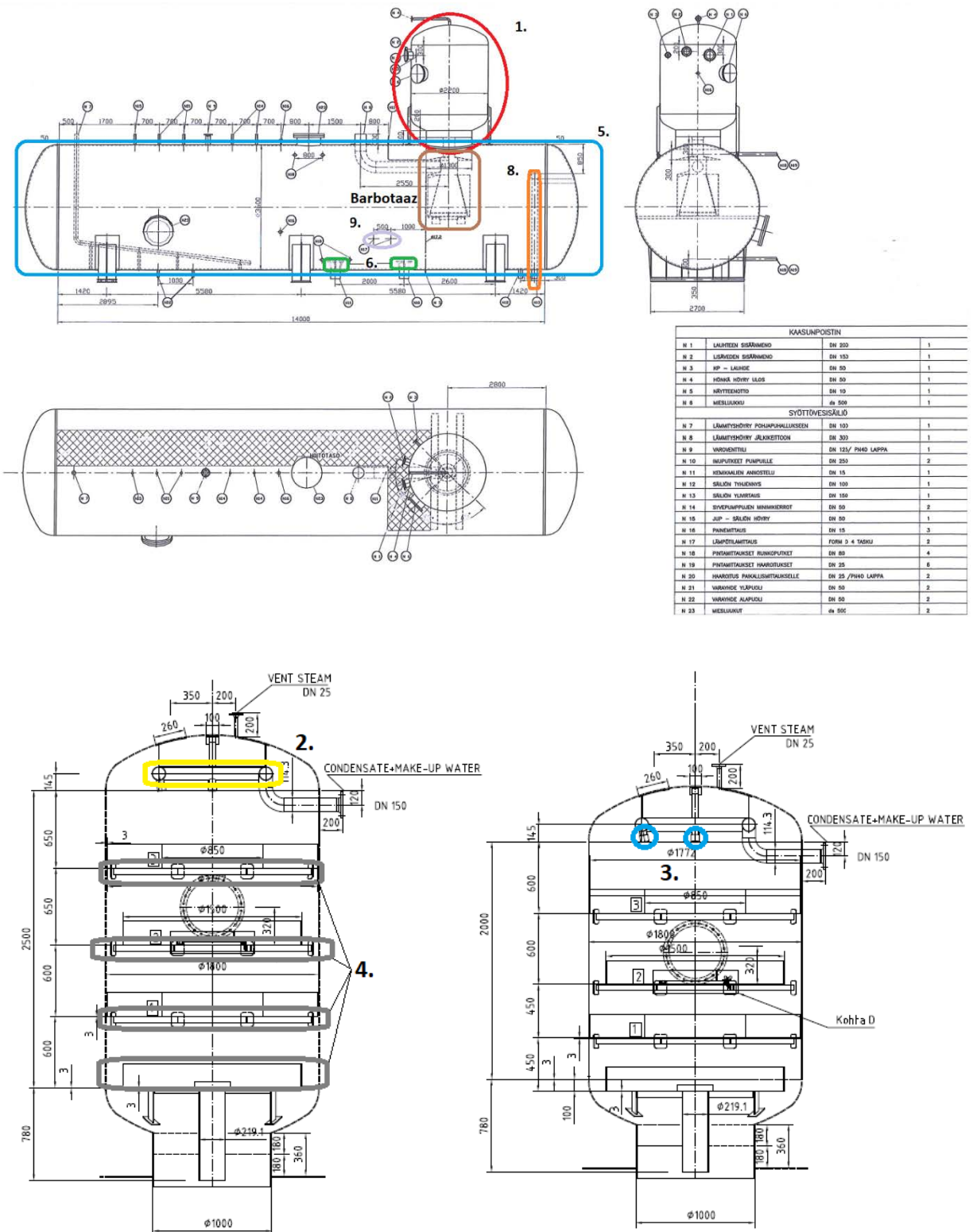
- [9] Heat Exchange Institute, „STANDARDS and TYPICAL SPECIFICATIONS for TRAY TYPE DEAERATORS“, 10th edition, Copyright 2016 by Heat Exchange Institute, Inc. 1300 Sumner Avenue Cleveland, Ohio 44115-2851 (inglise keeles).
- [10] “Algoritmimine” TTÜ informaatikainstituut [Võrgumaterjal]. Available: <http://rlpa.ttu.ee/Algoritmimine.pdf>
- [11] Ледуховский, Г.В. „Совершенствование технологии десорбции кислорода в струйно барботажных деаэраторах атмосферного давления“, диссертация канд. техн. наук: 05.14.14 / Ледуховский Григорий Васильевич. – Иваново, 2008. – 226 с. – Библиогр.: с. 182–193. (vene keeles).
- [12] Цюра, Д.В. „Регулирование расхода выпара термических деаэраторов“ / Д.В. Цюра, О.В. Малинина, В.И. Шарапов // Материалы Четвертой Российской науч.-техн. конф. «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» / УлГТУ. – Ульяновск, 2003. – С. 279–282. (vene keeles).
- [13] Шарапов, В.И. „Влияние расхода выпара на массообмен в термических деаэраторах“ / В.И. Шарапов, О.В. Малинина, Д.В. Цюра // Материалы Четвертой Российской науч.-техн. конф. «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» / УлГТУ. – Ульяновск, 2003. – С. 272-278, (vene keeles).
- [14] Vesi-Pauli Oy [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.vesipauli.fi/fi/index.html>
- [15] Сутоцкий, Г.П. Повреждения энергетического оборудования, связанные с водно-химическим режимом / Г.П. Сутоцкий. – СПб.: НПО ЦКТИ, 1992. – 256 с. (vene keeles).
- [16] Акользин, П.А. Предупреждение коррозии оборудования технического водо- и теплоснабжения / П.А. Акользин. – М.: Металлургия, 1998. – 224 с. (vene keeles).

LISAD

LISA 1 – Deaeraatori joonis

LISA 2 – Deaeraatori arvutuse plokk-skeem

LISA 1. Taldriktüüpi deaeratori joonis



Input

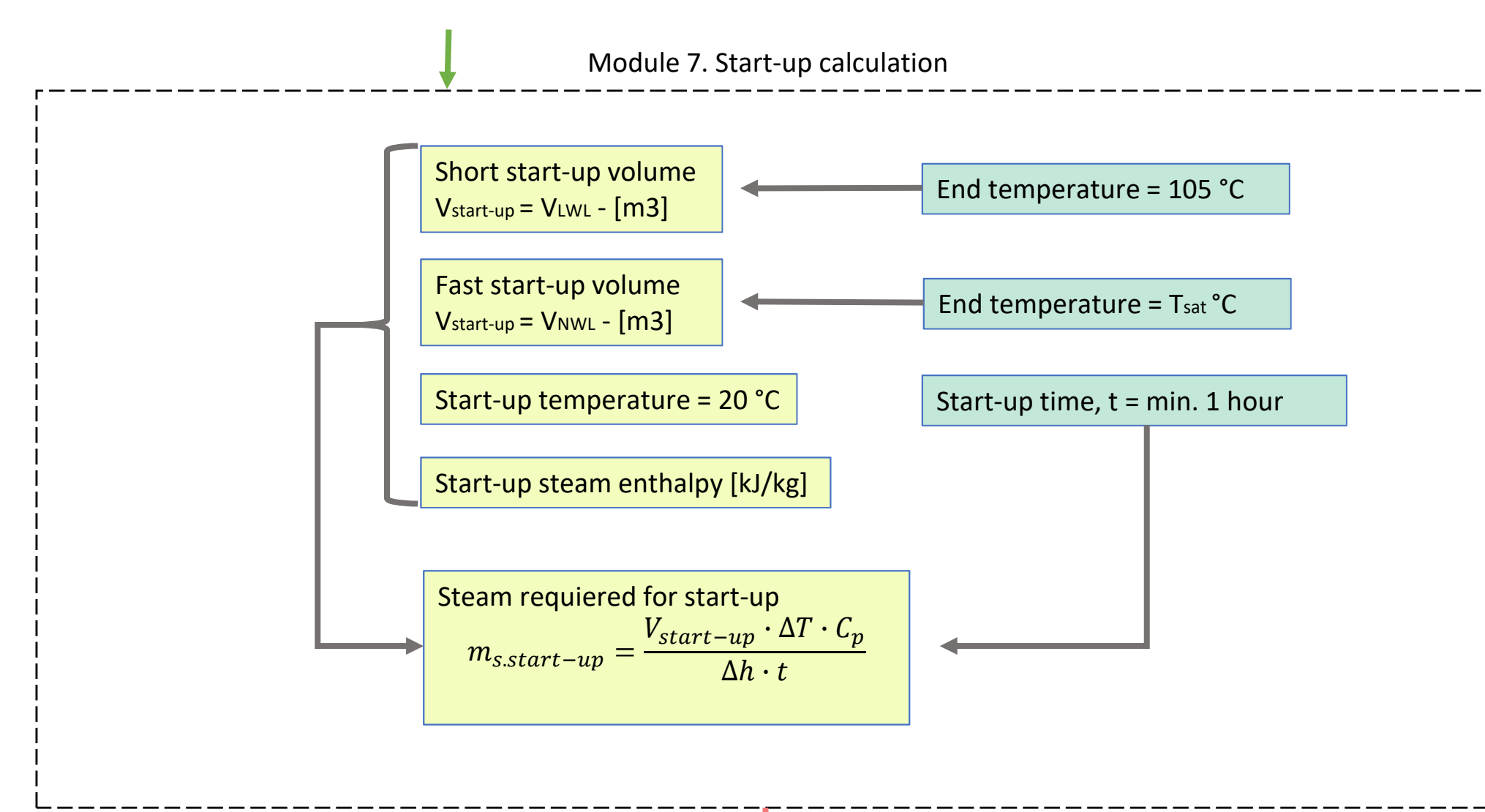
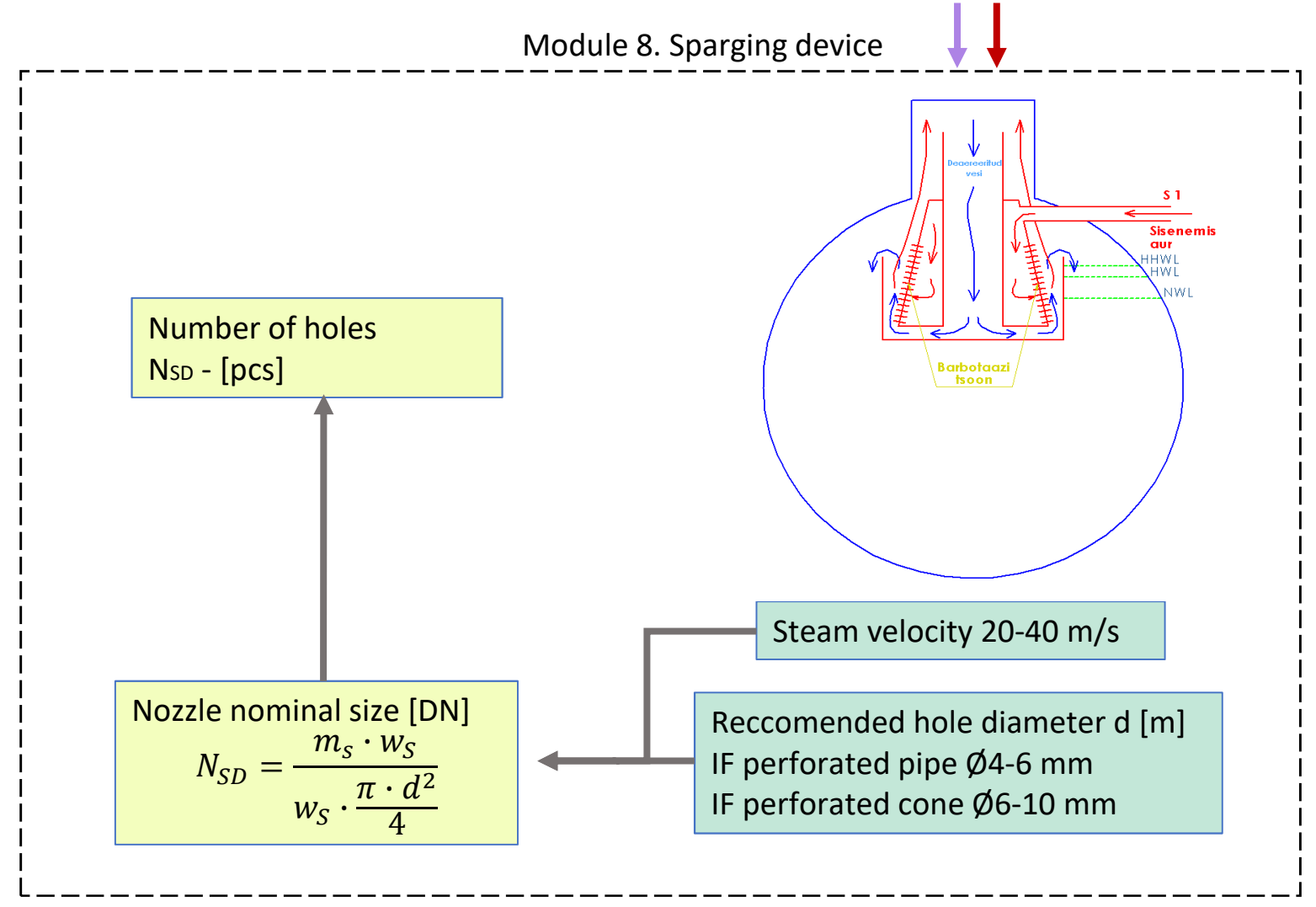
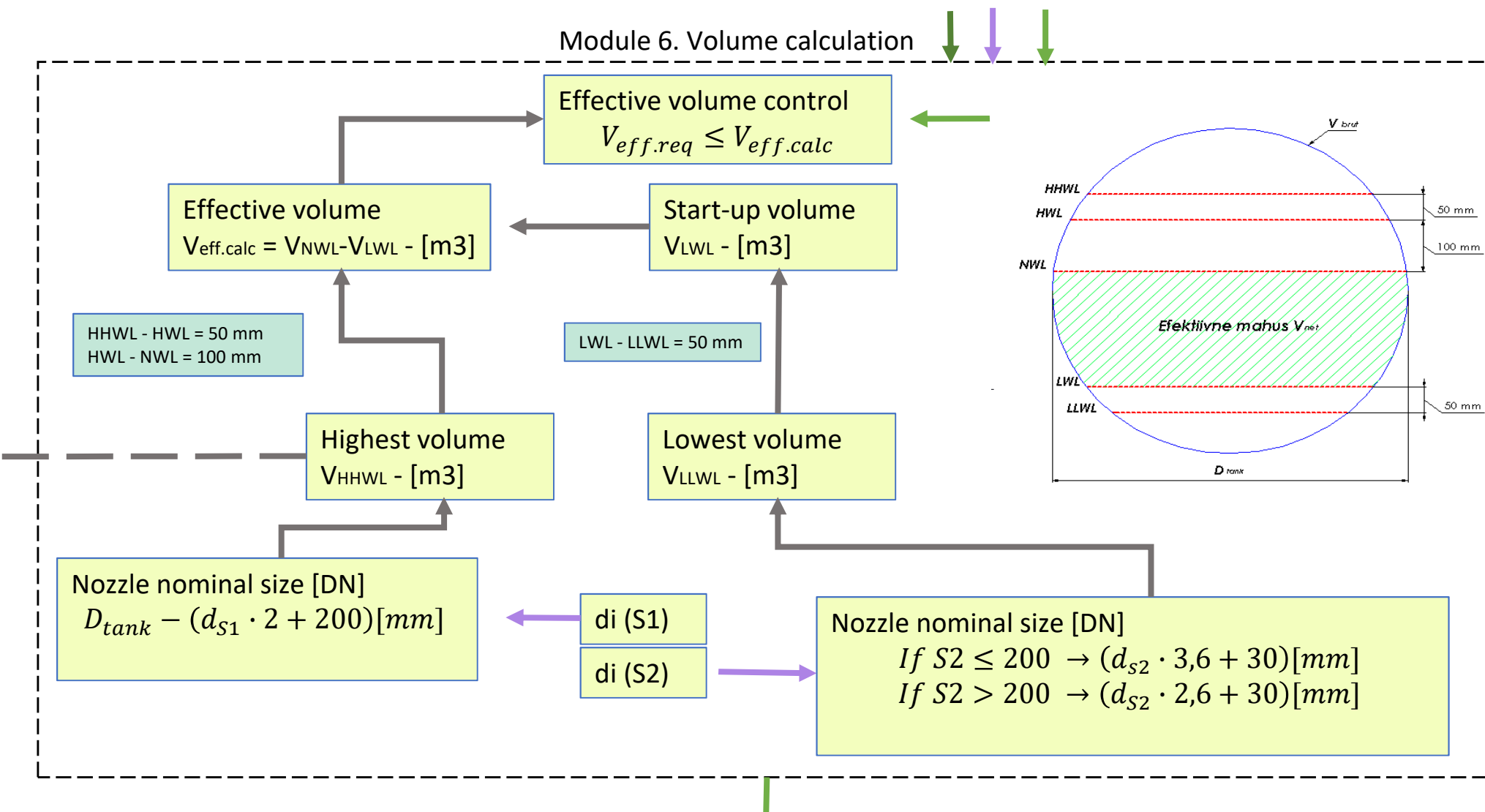
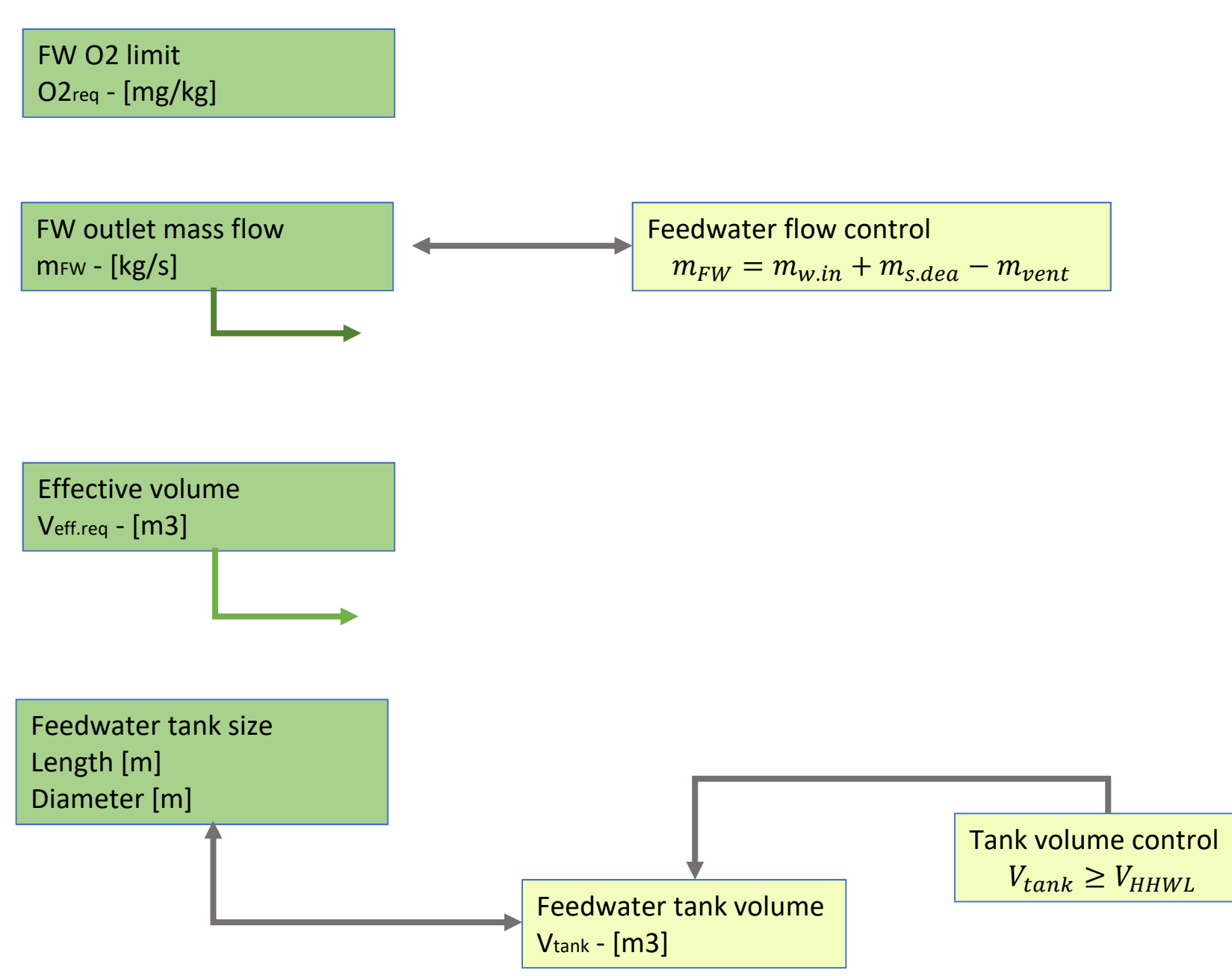
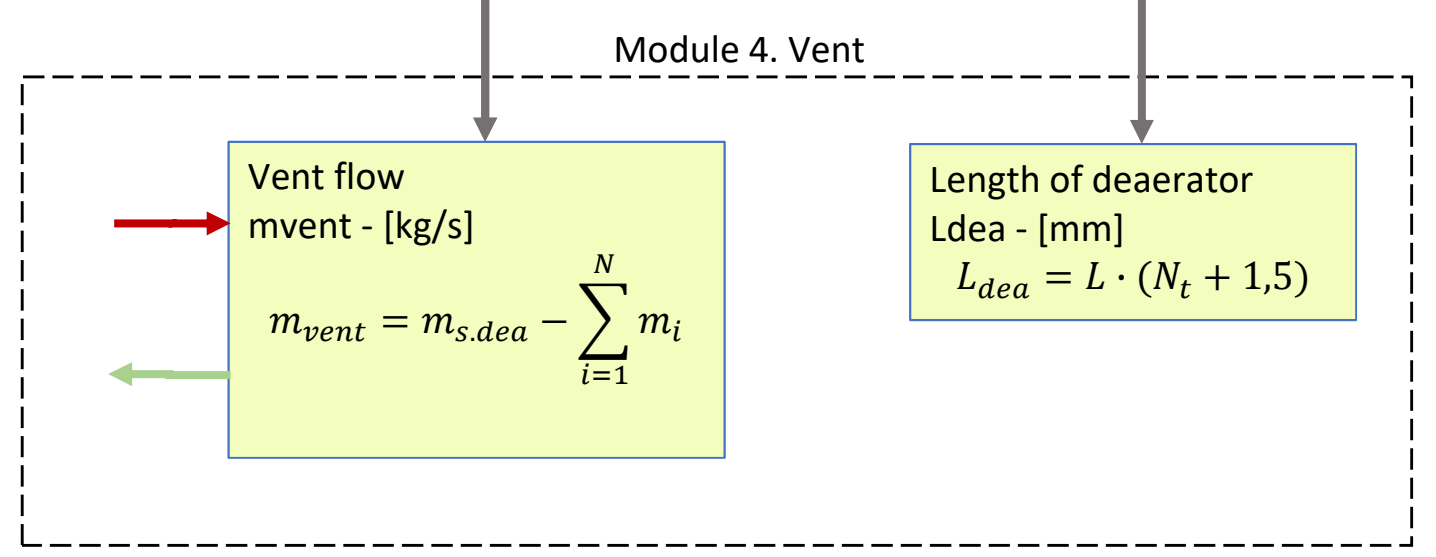
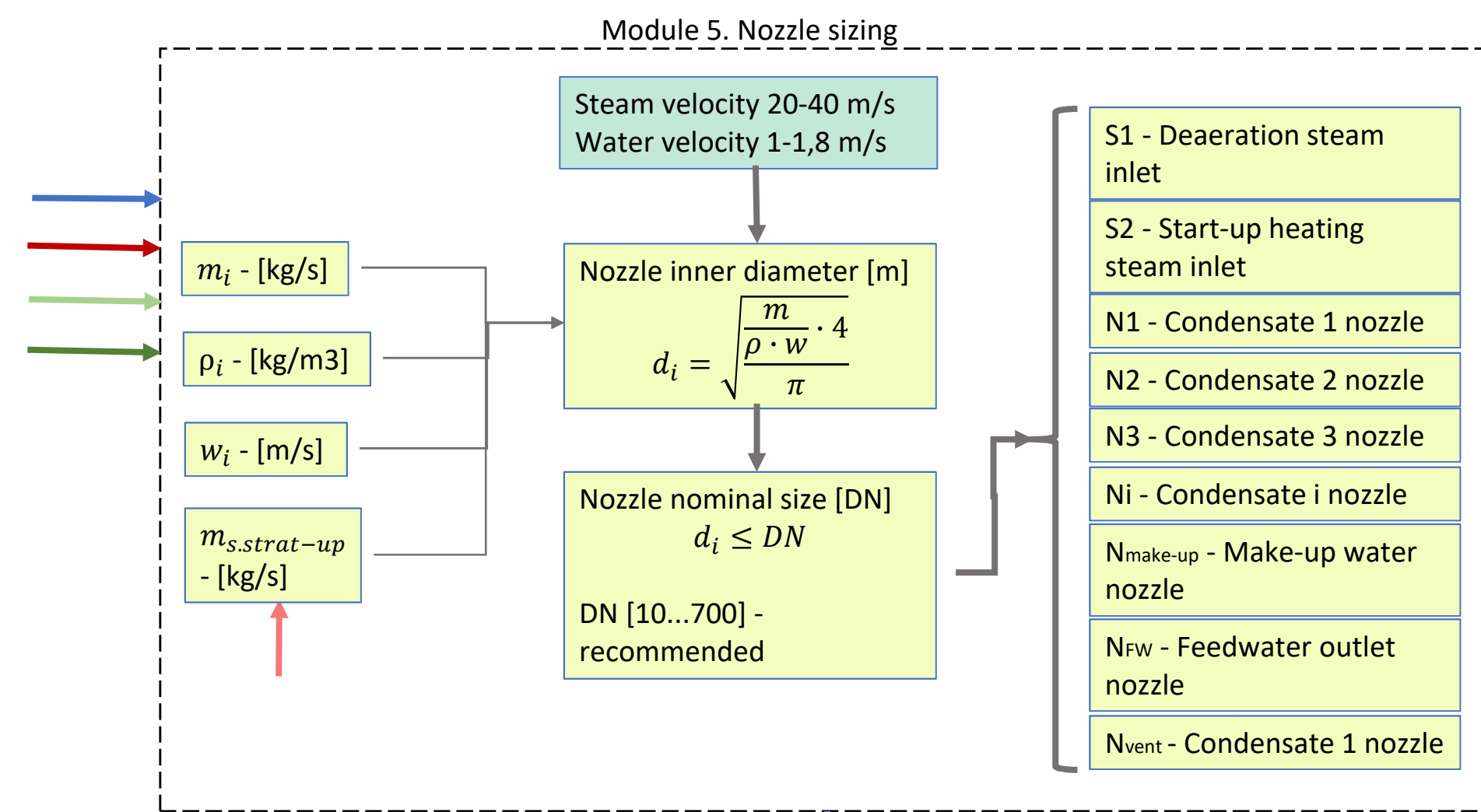
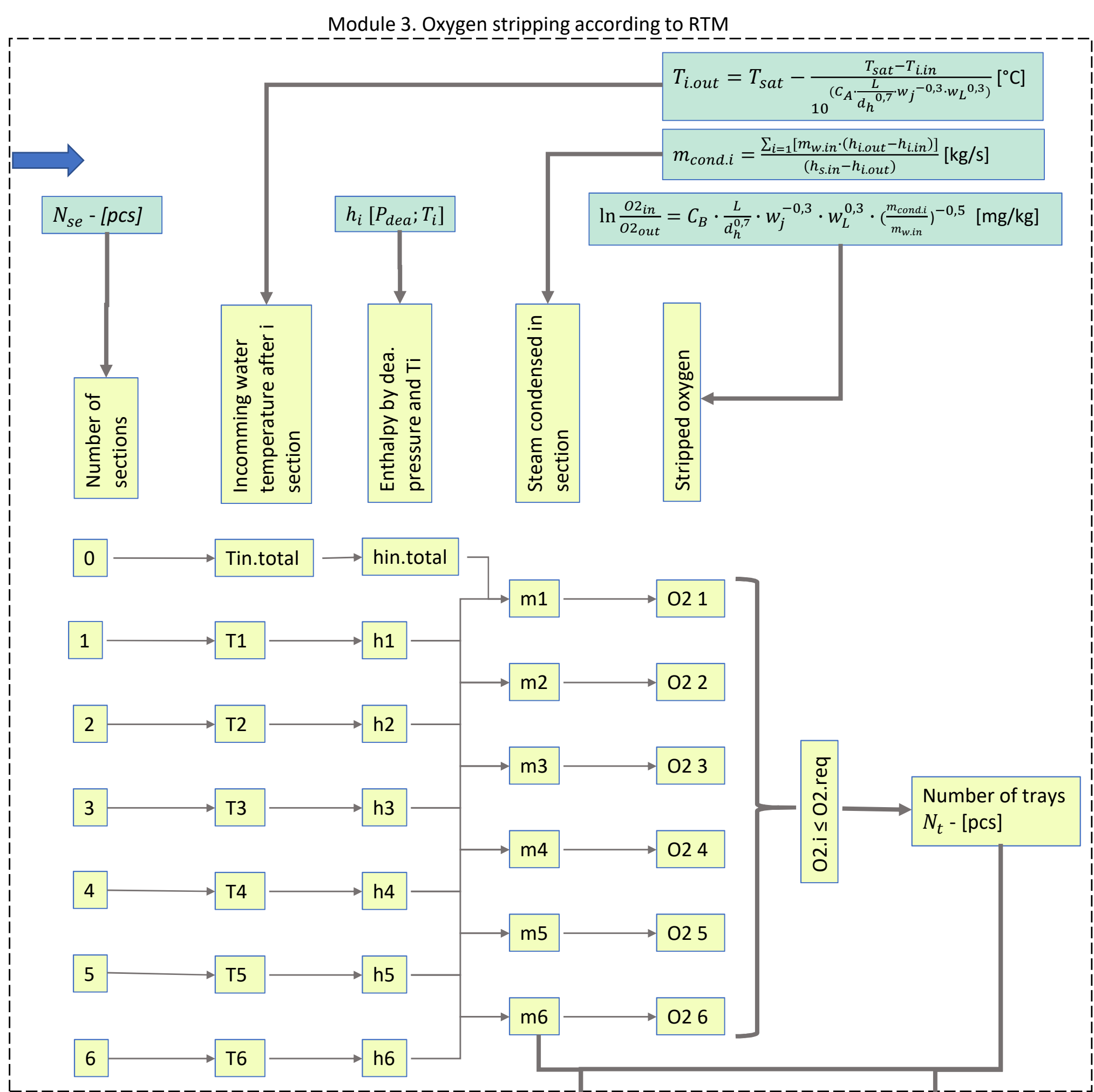
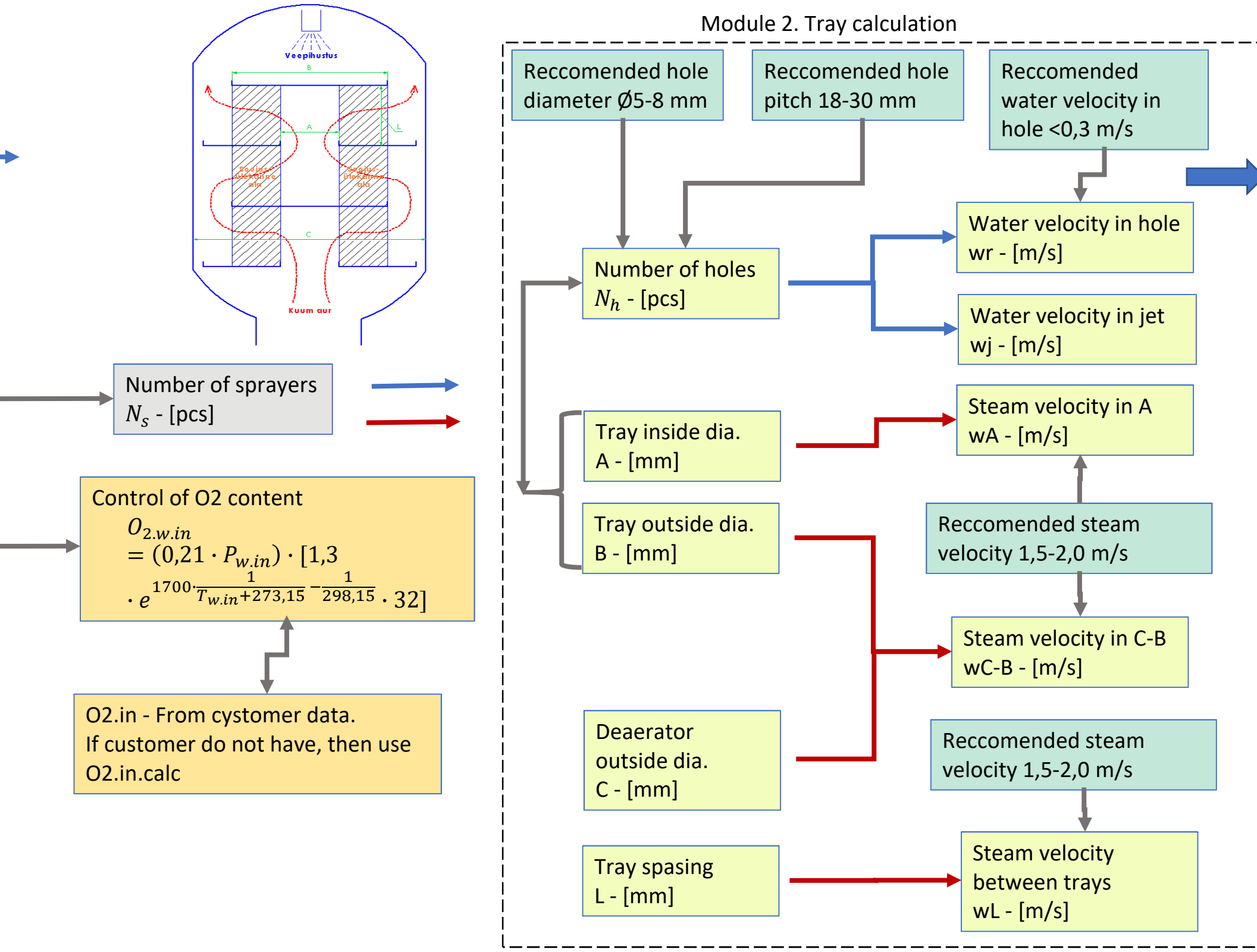
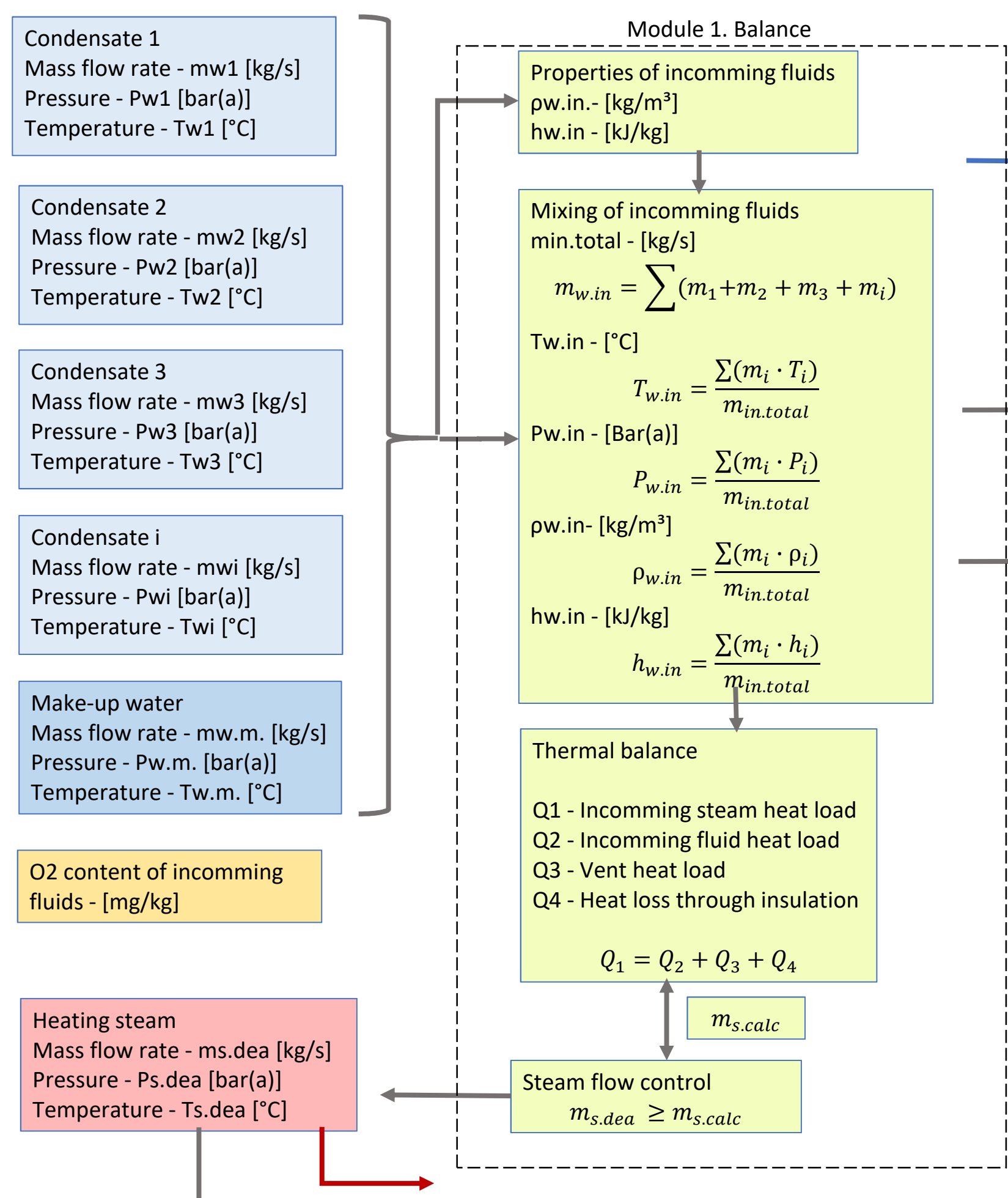


Table of symbols

- m - Mass flow rate [kg/s]
- P - Pressure [kg/s]
- T - Temperature [°C]
- w - Velocity [m/s]
- V - Volume [m³]
- HHWL - High high water level [m]
- HWL - High water level [m]
- NWL - Normal water level [m]
- LWL - Low water level [m]
- LLWL - Low low water level [m]
- d - nozzle diameter [m]
- D - Feedwater tank diameter [m]
- DN - Nominal nozzle size
- A - Tray inside diameter [m]
- B - Tray outside diameter [m]
- C - Deaerator column outside diameter [m]
- N - Number [pcs]
- L - length of jet

INDEX

- w - Water
- w.m. - Make-up water
- s - Steam for deaeration
- in - inlet
- out - outlet
- eff - Effective
- req - required
- r - velocity in hole
- j - jet velocity
- sp - sprayer
- h - hole
- t - tray
- se - section
- hs - hydrostatic
- dea - deaerator
- i - summary