



## АНАЛИЗА РАДА ДЕАЕРАТОРА У УСЛОВИМА ПРОМЈЕНЉИВОГ ОПТЕРЕЋЕЊА СИСТЕМА

## ANALYSIS OF DEAERATOR OPERATION IN CONDITIONS OF VARIABLE SYSTEM LOAD

Цвијета Илић, Факултет техничких наука, Нови Сад

### Област – МАШИНСТВО

**Кратак садржај** – Деаератори су важне компоненте електроенергетских система, за издвајање растворених гасова из воде. У овом раду анализирани су могући проблеми при раду деаератора током промјене оптерећења, појаве корозије и кавитације. Дат је и примјер утицаја промјенљивог параметра на рад деаератора и напојне пумпе.

**Кључне ријечи:** деаератор, деаерација, котло, напојна вода, корозија, кавитација, NPSH, напојна пумпа

**Abstract** – Deaerators are important components of power systems, for the separation of dissolved gases from water. Possible problems in deaerator operation during load change, such as corrosion and cavitation, are analysed in this paper. An example of the influence of a variable parameter on the deaerator operation and a feed pump is also given.

**Keywords:** deaerator, deaeration, boiler, feed water, corrosion, cavitation, NPSH, feed pump

### 1. УВОД

Проучавање динамичког понашања различитих делова опреме електране је од великог интереса у скоро свим областима, почевши од истраживања и дизајна, преко заштите при раду, до помоћи у доношењу одлука, оптимизације и анализе успјеха.

Деаератор је важна компонента електроенергетских система, у кругу за предгријавање напојне воде. Деаерација практично представља уклањање растворених гасова из воде која служи за напајање котла или за употребу у другим процесним јединицама. Гасови чије присуство може изазвати проблеме при раду котла су углавном кисеоник и угљен-диоксид који су природно заступљени у води. Ови гасови у нетретираној води дјелују као узрочници корозије у котловима и другим дијеловима постројења.

Поред његове улоге у устаљеним условима, правилан рад деаератора је изузетно важан и током прелазних режима, приликом покретања и прекидања рада електране.

### НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији је ментор био др Ђорђије Додер, доцент.

Један од проблема који се може јавити током ових периода је кавитација на усису напојне пумпе, а сврха деаератора јесте и да обезбједи потребну нето позитивну усисну висину (NPSH<sub>a</sub>) за пумпу. Може се десити да доступна нето позитивна усисна висина опадне током прелазног периода и изазове кавитацију и оштећења унутрашњих дијелова пумпе.

У овом раду су анализирани утицаји прелазних параметара на рад деаератора и напојне пумпе. Као примјер је дат утицај промјене температуре кондензата на притиске у деаератору и на усису напојне пумпе, као и на доступну нето позитивну усисну висину.

### 2. ПОЈАМ ДЕАЕРАТОРА И ДЕАЕРАЦИЈЕ

Деаератори су резервоари напојне воде под притиском који се називају и отворени гријачи напојне воде. Деаератори су критичне компоненте многих парних система и имају неколико функција:

- уклањање некондензујућих гасова из напојне воде котла;
- повећање температуре воде за допуну при уласку у систем;
- повећање температуре кондензата прије него што уђе у котло;
- обезбјеђивање складишног капацитета пречишћене напојне воде [1].

Процес деаерације се користи за смањење корозије и уклањање растворених гасова у посебним системима за напајање котловске воде. Присуство растворених гасова попут кисеоника и угљен-диоксида изазива убрзану корозију која скраћује животни вијек и смањује ефикасност котловског система [1].

Котлови и њихови помоћни системи су углавном израђени од угљеничног челика. Пошто је челик на бази гвожђа, а кисеоник реагује с гвожђем, долази до формирања црвеног оксида гвожђа, тј. рђе, док угљен-диоксид ствара слабу угљеничну киселину која нагриза метал. Због тога је императив да садржај растворених гасова у напојној води буде на што нижем нивоу [1].

Брзина корозије не зависи само од нивоа раствореног кисеоника и раствореног угљен-диоксида, већ и од температуре. Високе температуре изазивају високе стопе корозије, чак и са малим количинама растворених гасова. Из тог разлога, нискотемпературни парни системи могу толерисати много веће нивое раствореног кисеоника и угљен-диоксида него системи са високим температурама [1].

## 2.1. Принцип деаерације

Деаератори раде по Хенријевом закону парцијалног притиска, принципу физичке хемије који каже да је количина раствореног гаса у течности директно пропорционална парцијалном притиску изнад те течности. Када дође до деаерације, парцијални притисак изнад напојне воде котла се смањује како температура воде расте. Једноставније речено, растворљивост гасова у води се смањује са повећањем температуре воде.

Међутим, како се температура воде повећава и приближава температури zasiћења, тако се повећава и количина водене паре у атмосфери изнад течности. Када вода достигне пуну температуру zasiћења (тачку кључања), теоретски у води нема више кисеоника. Дакле, на основу ових физичких карактеристика може се закључити да се кисеоник може уклонити из воде повећањем температуре и смањењем концентрације раствореног кисеоника у атмосфери изнад воде [2].

Растворљивост гаса у течности изражена је Хенријевим законом:

$$C_{total} = k \cdot P \quad (1)$$

Гдје је:

$C_{total}$  – молска запреминска концентрација гаса у раствору [mol/l],  
 $P$  – парцијални притисак гаса изнад раствора [atm],  
 $k$  – константа пропорционалности, позната као Хенријева константа  $\left[ \frac{\text{mol}}{\text{l} \cdot \text{atm}} \right]$ .

Процес деаерације може се одвијати механички или хемијски. Деаератори представљају механичко рјешење, док хемикалије обезбјеђују хемијско рјешење.

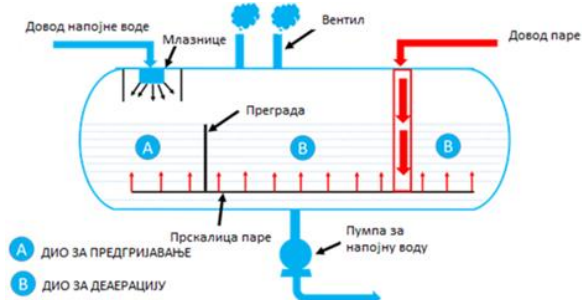
Уобичајни деаератор ће уклонити скоро сав растворени кисеоник и угљен-диоксид, а остатак ће уклонити чистачи кисеоника (натријум сулфид, хидразин, итд.) и чистачи угљен-диоксида (неутрализовани амини, бикарбонати, итд.).

Већина деаератора је пројектована да смањи ниво раствореног кисеоника на 7 ppb, при чему чистачи кисеоника уклањају остатак [1].

## 2.2. Типови деаератора

Деаератори под притиском су најефикаснији и најзаступљенији у данашњим електранама. Две уобичајене конструкције ових деаератора су са распршивачем и са перфорираним подовима.

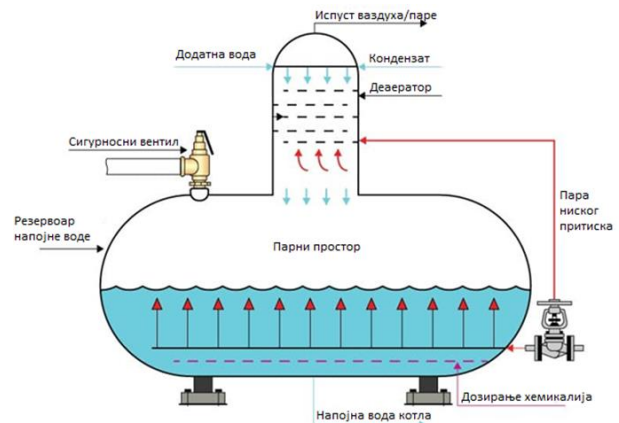
На слици 1 приказан је деаератор са распршивачем у облику хоризонталне посуде са два дијела, дијелом за предгријавање и дијелом за деаерацију. Дијелови су раздвојени преградом.



Слика 1: Деаератор са распршивачем [2]

Вода за напајање котла се доводи са горње стране и распршује се кроз млазнице које имају опруге. Притисак воде доводи до отварања млазница и прскања воде у деаератор. Она се предгријава паром која се доводи у суд. Распршивање воде осигурава велику површину контакта воде и паре, што осигурава добар пренос топлоте између двије фазе. Сврха предгријавања јесте подизање температуре напојне воде на температуру блиску температури zasiћења при радном притиску деаератора.

Претходно загријана напојна вода тада тече у дио за деаерацију која се одвија паром, а она се такође доводи распршивањем. Растворени гасови се уклањају из воде и излазе кроз вентилацију која је постављена на врху посуде. Коначно, третирана напојна вода се са дна посуде преко пумпе одводи до котла.



Слика 2: Деаератор са перфорираним подовима [1]

На слици 2 приказан је деаератор са перфорираним подовима. Ова врста деаератора састоји се из два суда, вертикалне посуде постављене изнад хоризонталне. Вертикална посуда представља дио за деаерацију, а хоризонтална резервоар воде за напајање котла [2].

Вода улази у одјелак за деаерацију кроз млазнице монтиране на водоравну цијев. Током прве фазе деаерације, вода се распршује на fine капљице изнад дијела са подовима. Вода се деаерише у другој фази, јер се каскадно спушта низ отворе у лежиштима. Пара ниског притиска улази у кућиште испод подова и протиче на горе према води. Комбиновано дјеловање прве и друге фазе деаерације гарантује изузетно високе перформансе, јер омогућава дуже вријеме контакта између паре и воде. Пара уклања растворене гасове из напојне воде котла и излази преко вентилационог прикључка на врху посуде (или куполе деаератора) [2,3].

## 3. УТИЦАЈ ПРЕЛАЗНОГ РЕЖИМА РАДА ДЕАЕРАТОРА НА РАД ПУМПЕ

У типичним парним системима, на усис напојне пумпе котла долази вода из деаератора, подиже се притисак воде и даље се кроз гријаче одводи у котлоу. Током нормалног рада, пара одведена са турбине доводи се у деаератор и загријава напојна вода. Друге сврхе деаератора су да обезбједи потребну нето позитивну усисну висину (NPSH) за пумпу и да служи

као резервоар за складиштење да би се обезбједило континуирано снабдјевање напојном водом током брзих промјена оптерећења.

Доступна нето позитивна усисна висина која се обезбјеђује пумпи током рада може опати услед промјене притиска и изазвати кавитацију и оштећења унутрашњих дијелова пумпе. Пажљивом анализом различитих радних услова може се обезбједити да пумпа ради безбједно током флукуација притиска које се јављају након искључења парне турбине или великих промјена оптерећења.

Проблем кавитације укључује многе термодинамичке и димензионалне факторе. Настаје када услед смањења усисног притиска течност почне да кључа. Мјехурићи паре се формирају, насилно имплодирајући када уђу у област високог притиска пумпе. Ово ствара буку, ерозију, треперење и вибрације. Ако се мјехурићи скупе и формирају парну шупљину, у пумпи се могу догодити велики удари када дође до урушавања шупљина. Акумулирана штета од ових краткотрајних догађаја може на крају довести до катастрофалног квара пумпе.

Постоје двије енергије усисавања које треба узети у обзир. Пумпи је доступна усисна енергија  $NPSH_a$ , а усисна енергија која је потребна пумпи је  $NPSH_r$ . Веома је битно направити разлику између ове двије вриједности. Потребна усисна енергија пумпе ( $NPSH_r$ ) увијек мора бити мања од расположиве усисне енергије ( $NPSH_a$ ) у свим радним тачкама [4].

### 3.1. Прелазне вриједности NPSH напојне пумпе

У типичном систему деаерисања и загријавања напојне воде, деаератор издваја ваздух и заргијава напојну воду директним контактом са паром одведеном из парне турбине. У њему се складишти мјешавина напојне воде у парном и течном стању. Унутрашњи притисак деаератора је једнак притиску паре течности, што представља „засићене услове“. Притисак паре напојне воде је функција температуре. Температура напојне воде и притисак паре у деаератору су исти као и на усису пумпе [4].

Када електрана смањи оптерећење, парна турбина ће смањити количину паре коју преко гријача шаље до деаератора, или ће у потпуности престати да је шаље. Притисак у деаератору ће почети да опада услед губитка притиска паре, кондензације паре и прилива хладнијег кондензата.

Смањење притиска у деаератору узрокује да дио воде почне да испарава док се не постигне засићење на новом притиску. На воду у усисном воду дјелује статички притисак, који зависи од нивоа воде у резервоару, и одлаже почетак испаравања.

Дакле, маса напојне воде у усисној цијеви дјелује као чеп и изолује пумпу од промјена температуре и притиска које се дешавају у деаератору. Ова изолација траје све док цијела количина напојне воде у усисној цијеви не буде имала прилику да прође кроз пумпу и израчунава се дијељењем масе воде у усисној цијеви са масеним протоком пумпе. Кашњење се назива „вријеме задржавања“.

Током проласка топле воде, комбинација високог притиска паре на усису пумпе заједно са смањењем усисног притиска пумпе (због опадања притиска у деаератору) доводи до „критичне тачке“ на којој усисни притисак може пасти испод минималног потребног притиска (притисак паре плус притисак еквивалентан  $NPSH_r$ ). Овај низак усисни притисак може довести до оштећења унутрашњости пумпе од кавитације због недовољне  $NPSH$  [4].

### 3.2. Вријеме задржавања

Вријеме потребно за пролаз топле воде кроз усисни вод пумпе је „вријеме задржавања“. Вријеме задржавања се може изразити као запремина усисног вода подијељена запреминским протоком или као маса течности у усисном воду подијељена са масеним протоком.

С обзиром да је притисак паре на усису пумпе моделиран да опада тек након што истекне вријеме задржавања, критична тачка се јавља на крају временског интервала задржавања. Изазов представља одредити притисак деаератора у овој критичној тачки, а тиме и маргину система  $NPSH$  [4].

### 3.3. Успостављање криве опадања притиска деаератора

Најједноставнији начин да се изрази опадање притиска у деаератору је експоненцијална једначина за енталпију. Одговарајући притисак деаератора у било ком тренутку је притисак засићења при израчунатој енталпији воде:

$$h_d = h_{nc} + (h_1 - h_{nc}) e^{\left(\frac{-W_c}{M}\right)t} \quad (2)$$

Гдје је:

$h_d$  – енталпија воде у деаератору у било ком тренутку,  $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$ ,

$h_{nc}$  – енталпија кондензата,  $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$ ,

$h_1$  – почетна енталпија воде у деаератору,  $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$ ,

$W_c$  – проток кондензата након прекида паре,  $\left[\frac{kg}{min}\right]$

$M$  – маса воде у деаератору,  $[kg]$ .

Стварни притисак на усису напојне пумпе је једноставно притисак паре израчунат једначином плус статички притисак у деаератору умањен за губитке на трење у усисном цјевоводу напојне пумпе.

Ова једначина прилично добро моделира систем, али не узима у обзир топли кондензат садржан у гријачима ниског притиска и цјевоводу за кондензат [4].

### 3.4. Примјер прорачуна

Овај примјер илуструје процјену утицаја промјене температуре кондензата на притисак у деаератору и притисак на усису напојне пумпе током времена задржавања.

Познати подаци о деаератору:

Притисак у деаератору у почетном тренутку: 5 bar;

Почетна температура воде у деаератору: 152 °C;

Енталпија воде у деаератору у том тренутку: 640  $\frac{kJ}{kg}$ ;

Проток кондензата:  $206400 \frac{kg}{min}$ ;  
 Температура кондензата:  $40 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 Маса воде у резервоару за складиштење:  $7000 \text{ kg}$ ;  
 Вријеме задржавања:  $0,5 \text{ min}$ ;  
 Статички притисак на усису напојне пумпе:  $2,3 \text{ bar}$

На основу једначине (2) и познатих података добијају се резултати везани за промјену притиска у деаератору, а самим тим и на усису напојне пумпе.

Резултати су приказани у наредној табели.

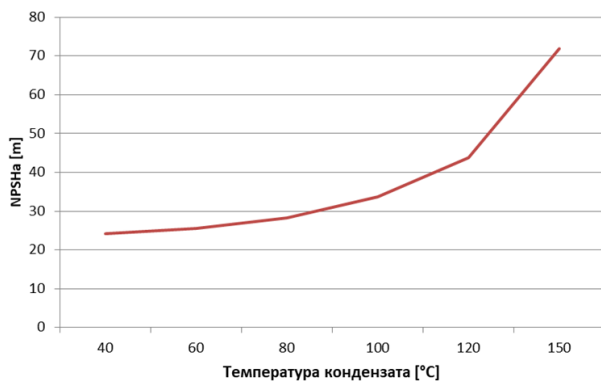
Табела 1: Утицај температуре кондензата на притисак у деаератору и притисак на усису напојне пумпе

$T_{kond.}$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$h_{kond.}$ [ $\frac{kJ}{kg}$ ]	$h_{deaer.}$ [ $\frac{kJ}{kg}$ ]	$p_{deaer.}$ [bar]	$p_{usis}$ [bar]
40	167,5	167,5	0,0737	2,3737
60	251,1	251,1	0,1992	2,4992
80	334,9	334,9	0,4736	2,7736
100	419,5	419,5	1,0131	3,3131
120	503,7	503,7	1,9854	4,2854
150	632,2	632,2	4,76	7,06

У овом случају вријеме задржавања је 0,5 минута, што значи да су у том периоду вриједности на усису напојне пумпе непромјењене. Као што је већ поменуто, критична тачка се јавља на крају овог временског интервала. У табели су приказане вриједности притиска на усису у том тренутку.

Како се мијењају параметри система, мијења се и притисак на усисној страни напојне пумпе. Услед промјене оптерећења постројења мијења се температура кондензата који се доводи у деаератор, а она има велики утицај на вриједност усисног притиска.

Ова зависност графички је приказана на следећем дијаграму.



Слика 3: Зависност NPSHa од температуре кондензата

Посебну пажњу при моделирању система, треба посветити анализи ових вриједности при најнижој могућој температури кондензата. Комбинација високог притиска паре на усису и смањеног усисног притиска пумпе доводи до критичне тачке на којој усисни притисак може пасти испод минималног дозвољеног. Уколико дође до овога, очекује се да ће пумпа кавитирати. То значи да је дизајн неадекватан и да га треба ревидирати.

#### 4. ЗАКЉУЧАК

Деаератор је веома сложен елемент система у кругу припреме напојне воде, посебно током прелазних периода, приликом пуштања у рад електрана и искључивања. Коришћењем модела, његово понашање током експлоатације се може пратити и различити кварови се могу избјећи, попут појава корозије и кавитације.

Једна од могућности побољшања наведених експлоатационих проблема је и примјена напреднијих система контроле, који укључују имплементацију експертских система и контроле засноване на сложенијим моделима него што је то случај у конвенционалним постројењима.

#### 5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] <https://savree.com/en/encyclopedia/deaerator> (приступљено у јануару 2022.)
- [2] <https://watertreatmentbasics.com/how-does-deaerator-work/> (приступљено у јануару 2022.)
- [3] <https://deaerator.com/deaerator-purpose-types-functions/> (приступљено у фебруару 2022.)
- [4] <https://www.powermag.com/can-your-boiler-feed-pump-handle-a-deaerator-pressure-transient/> (приступљено у фебруару 2022.)

#### Кратка биографија:



**Цвијета Илић** рођена је 1997. године у Требињу. Мастер рад на Факултету техничких наука, из области Машинства – Термоенергетика одбранила је 2022. год.

Контакт: [cvijetailic1@gmail.com](mailto:cvijetailic1@gmail.com)