

Rektifikáló oszlop szabályozása a kőolaj alkotó összetevőinek szétválasztására

Prof. Haber Robert

Köln, Cologne University of Applied Sciences

Az esettanulmány egy folyadékelegy két összetevőjének szétválasztásával foglalkozik. A szétválasztás az összetevők különböző forráspontján alapul. Például a borból az etilalkohol és a víz különválasztható, mivel légköri nyomáson az alkohol forráspontja 78°C , a vízé pedig 100°C . Ugyanez az eljárás alkalmazható a kőolajfinomítókban a kőolaj összetevőinek szétválasztására rektifikáló oszlopokban. Mivel egy rektifikáló oszlop egy két-bemenetű, két-kimenetű ún. TITO (Two-Input, Two-Output) folyamat (a többváltozós folyamat egy speciális esete), két lényeges technikát kell alkalmazni az irányításnál:

1. A két beavatkozó mennyiség (változó) és a két szabályozott mennyiség megfelelő összerendelése, ha csupán két egymástól független szabályozót alkalmazunk.
2. Egy kétváltozós szabályozó tervezése, amely biztosítja a két szabályozási kör szétcsatolását is, vagyis az egyik beavatkozó változó csak az egyik, a másik beavatkozó változó csak a másik szabályozott változót befolyásolja.

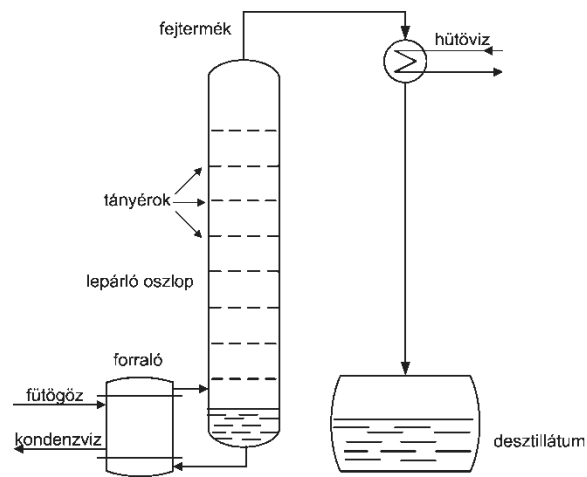
Az első feladatot az ún. RGA (Relative Gain Array: relatív erősítési tényezők mátrixa) módszerrel valósítjuk meg, míg a második feladatot modell alapú predikciós irányítás tervezésével.

A szabályozási feladat megoldásának tárgyalása előtt röviden leírjuk a desztilláció folyamatát. Az egyszerűség kedvéért bináris folyadékelegyet tekintünk, amely csak két összetevőt tartalmaz. A desztilláció a leggyakrabban alkalmazott technika folyadékelegyek összetevőinek szétválasztására. Elsősorban a vegyiparban és a kőolajfeldolgozásban alkalmazzák.

1. Batch desztilláció

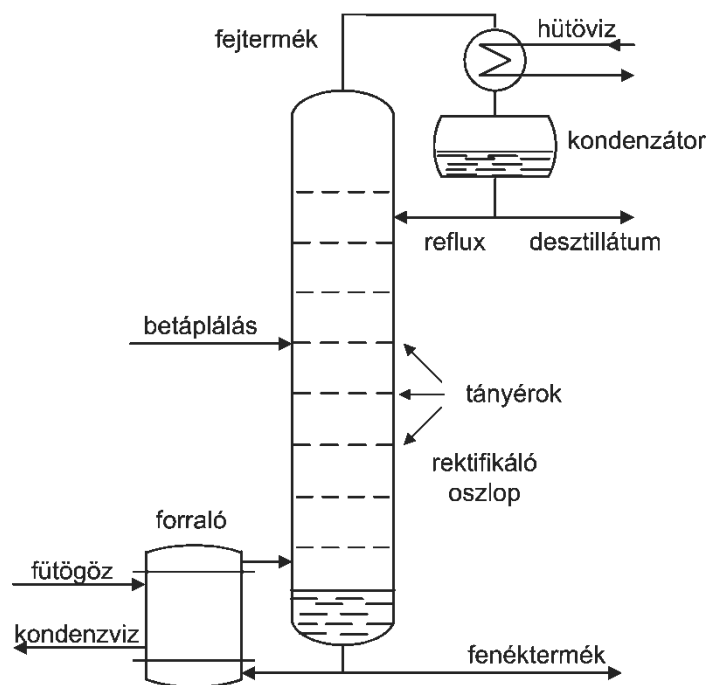
A desztillációt a folyadékösszetevőknek az elegyből való szétválasztására alkalmazzák. Az eljárás az összetevők eltérő forráspontján alapul. Ha a folyadékelegyet fűtjük, és a hőmérséklet eléri az alacsonyabb forráspontú összetevő forráspontját, akkor ez az összetevő elpárolog és eltávozik a folyadékelegyből. A gőz halmazállapotban lévő összetevőt ezután a kondenzátorban lehűtjük és így visszanyeri folyadék halmazállapotát. Így az elpárolgott és a folyadékállapotában megmaradt összetevőket szétválasztottuk. Ebben a folyamatban azonban mindkét folyadékösszetevő koncentrációja állandóan változik.

Ezt a folyamatot batch desztillációnak nevezzük, mivel nincs betáplálás a rendszerbe és csak az elpárolgatott összetevőt vezetik el a rendszerből.



1. ábra: Batch desztilláció

2. Folyamatos desztilláció



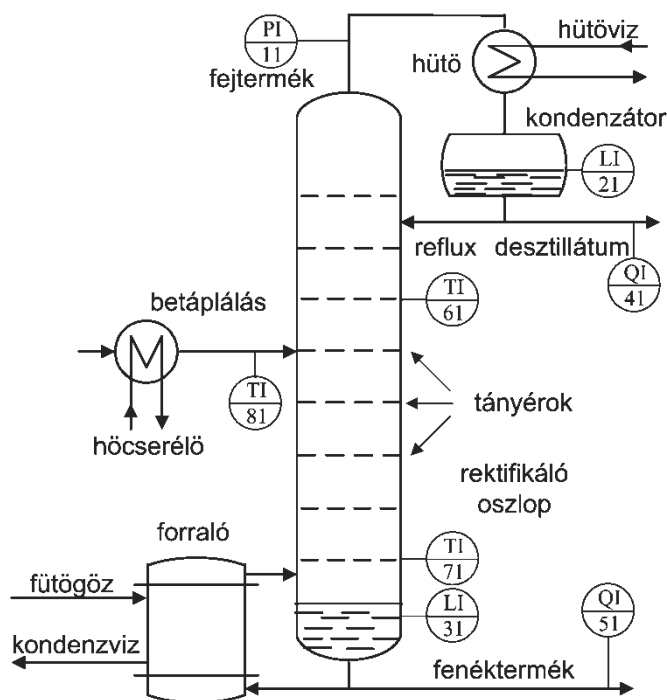
2. ábra Folyamatos desztilláció

Folyamatos desztillációnál a folyadékelegyet folyamatosan tápláljuk a rendszerbe (betáp), és a két különböző koncentrációjú terméket folyamatosan vezetjük el. A folyamatos desztilláció előnye a batch desztillációval szemben az, hogy a szétválasztott összetevők koncentrációja és mennyisége állandó értéken tartható.

A berendezést, amely a folyamatos desztillációt több tényér segítségével biztosítja, rektifikáló oszlopnak nevezzük. (Sokszor egyszerűen lepárló oszlopnak vagy kolonnának is nevezik.) A folyadékelegyet a rektifikáló oszlop közepén táplálják be. A folyékony halmazállapotú összetevő lefelé áramlik és egy része elhagyja az oszlopot ún. fenéktermékként. A folyadék másik része elpárolog a forralóban és a gőz felfelé áramlik. Az oszlop tetején a gőz elhagyja a kolonnát és hűtéssel folyadék halmazállapotúvá kondenzálják. Ezt a folyadékot két részre osztják. Egy része desztillátumként (néha fejterméknek is nevezik) elhagyja a kolonnát. A maradék részt visszavezetik az oszlopba ún. refluxként. A lefelé áramló folyadék találkozik a felfelé áramló gőzzel az oszlop különböző tényérjainál, ahol a gőz lecsapódik és a folyadék párolog. Az egyes tényérokön a gőz és a folyadék hő- és koncentráció-egyensúlyba kerül.

Egy adott tényérnél (egy adott magasságnál) a koncentráció megegyezik a betáplálás koncentrációjával. Ez az a pont, ahol a betáplálást be kell vezetni a kolonnába, hogy az ne zavarja meg a működést.

3. A rektifikáló oszlop műszerezése és irányítása



3. ábra Rektifikáló oszlop a mérési helyekkel

A rektifikáló oszlop különböző változói befolyásolhatók szabályozással. Csaknem mindegyikük kölcsönhatásban van a többi változóval is.

- Gyakran a betáplálás egy másik rektifikáló oszlop terméke, ami nem befolyásolható az aktuális lepárló egységgel. A hőmérséklet (TI-81) könnyen befolyásolható a hőcserélő előhűtésével.
- Az oszlop alján a szintet (LI-31) szabályozni kell, hogy megakadályozzuk, hogy a reboiler kiürüljön, vagy hogy az oszlopot elárhassa a folyadék. Továbbá a fenéktermék (QI-51) összetételét is szabályozni kell. Ennek érdekében a fűtőgőz mennyiségét és a termék mennyiségét befolyásoljuk a megfelelő szelepek állításával.
- Az kondenzátortartály szintjét (LI-21) és a fejtermék minőségét (QI-41) szabályozni kell. Ennek érdekében a reflux áramot és a fejtermék áramlását szabályozzuk a megfelelő szelepek állításával. A hűtés erősségével beállítható az oszlop kívánt nyomása (PI-11). A 3. ábra vízhűtést mutat, egyes alkalmazásokban természetes léghűtést használnak. A léghűtéses megoldás olcsóbb, de forró napokon nem üzemel hatásosan.

Az összetevők minőségének (összetételének) szabályozása helyett az oszlop végpontjaihoz közeli hőmérsékletek (TT-61 és TT-71) szabályozhatók, ami kevésbé drága megoldás, de figyelembe kell venni, hogy a koncentrációt a hőmérséklet mellett a nyomás is befolyásolja.

Egyes bemenő változók nem állandóak és zavarják a szabályozás működését. A hűtő- és fűtőközeg hőmérséklete és nyomása változhat. A betáplálás mennyisége és minősége függ az előző folyamattól és ezáltal paraméterei (átáramló mennyiség, hőmérséklet és összetétel) változhatnak. A szabályozás célja mindezen zavarások hatásának kiküszöbölése és a fej- és fenéktermék kívánt összetételének biztosítása.

4. Szabályozási struktúrák, ha csak egy minőséget (összetételt) szabályozunk

Különböző stratégiák ismertek a rektifikáló oszlop egy összetevő minőségének (összetételének) szabályozására (például: Buckley et. al, 1985). A tapasztalatok azt mutatják, hogy

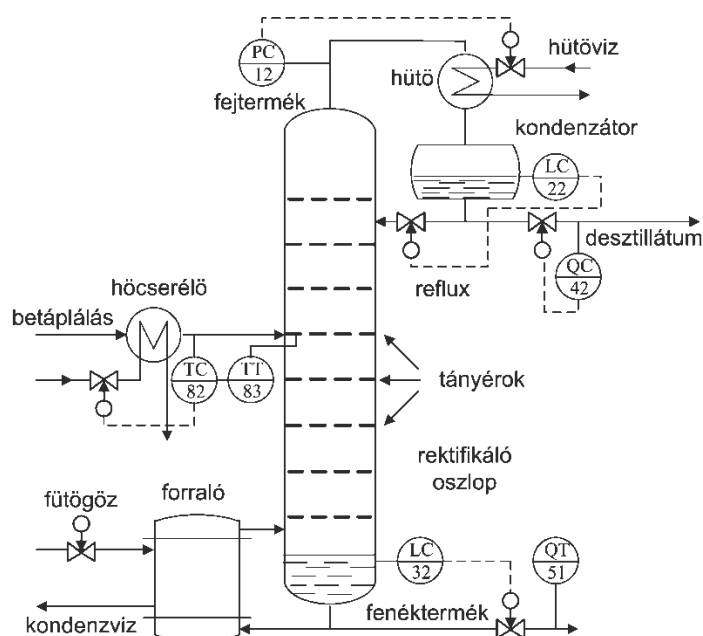
- a termékáramok összetételei érzékenyebbek a tömegegyensúly változására, mint az energiaegyensúly változására.
- kerülni kell a nagy holtidőket, például a fenékfolyadék áramlását nem a refluxárammal kell szabályozni, stb.

Vannak jól bevált szabályozási módszerek, mint pl. a nyomás hűtéssel való szabályozása. Egyetlen termék minőségének szabályozására a négy legáltalánosabb szabályozási lehetőséget az 1. Táblázat adja meg.

1. Táblázat: Különböző szabályozási stratégiák a desztillátum minőségének szabályozására

Eset	Beavatkozójel a tartálysint szabályozásához	Beavatkozójel a fenékszint szabályozásához	Beavatkozójel a minőség (összetétel) szabályozásához	Nem használt beavatkozójel
1	Reflux áram	Fenektermék áramlása	Desztillátum áramlás	Fűtőgőz áramlás
2	Desztillátum áramlás	Fűtőgőz áramlás	Fenektermék áramlása	Reflux áramlás
3	Desztillátum áramlás	Fenektermék áramlása	Fűtőgőz áramlás	Reflux áramlás
4	Desztillátum áramlás	Fenektermék áramlása	Reflux áramlás	Fűtőgőz áramlás

A desztillátum koncentrációjának legtipikusabb szabályozását a 4. ábra mutatja. A kondenztartály szintjét a refluxáram szabályozza. A fenék folyadék szintet a fenéktermék áramlás szabályozza. A forraló gőzárámát nem használjuk szabályozásra, ez felhasználható a költség hatékonyság optimalizálására.



4. ábra Rektifikáló oszlop, a desztillátum koncentrációját szabályozzuk

Szabályozási struktúrák mindkét összetétel szabályozásával

A lehetséges szabályozási kombinációk az alábbiak:

1. eset: energiaegyensúlyt biztosító szabályozási struktúra:

- a desztillátum koncentrációját a refluxárammal szabályozzuk,
- a fenéktermék koncentrációját a gőzáram fűtésével szabályozzuk,
- a kondenztartály szintjét a desztillátumárammal szabályozzuk,
- a folyadék szintjét az oszlop alján a fenéktermék áramával szabályozzuk

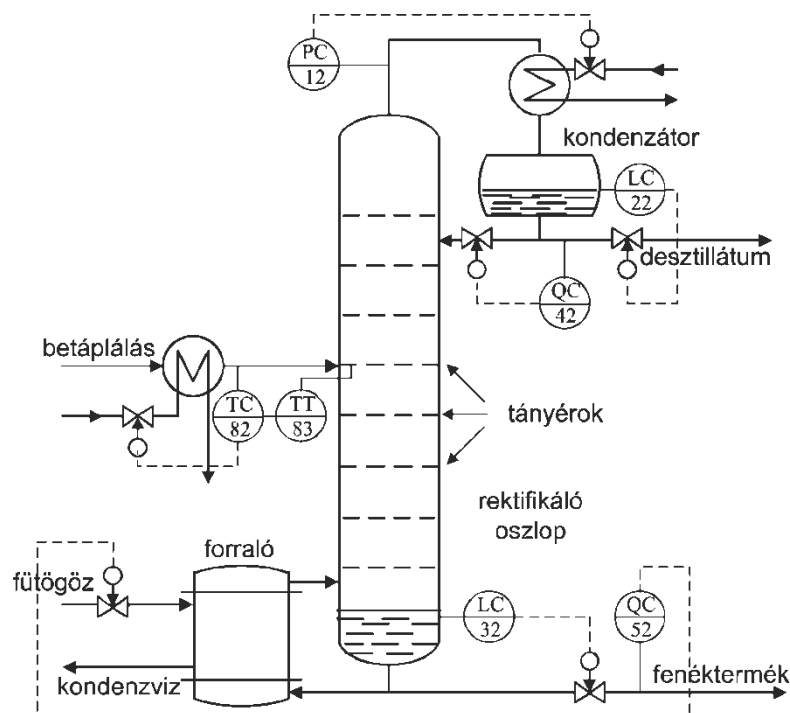
2. eset: tömegegyensúlyt biztosító szabályozási struktúra:

- a desztillátum koncentrációját a desztillátum áramló mennyiségével szabályozzuk,
- a fenéktermék koncentrációját a gőzáram fűtésével szabályozzuk,
- a kondenztartály szintjét a refluxárammal szabályozzuk,
- a folyadék szintjét az oszlop alján a fenéktermék áramával szabályozzuk

3. eset: tömegegyensúlyt biztosító szabályozási struktúra:

- a desztillátum koncentrációját a refluxárammal szabályozzuk,
- a fenéktermék koncentrációját a fenéktermék áramával szabályozzuk,
- a kondenztartály szintjét a desztillátumárammal szabályozzuk,
- a folyadék szintjét az oszlop alján a fűtőgőz mennyiségével szabályozzuk.

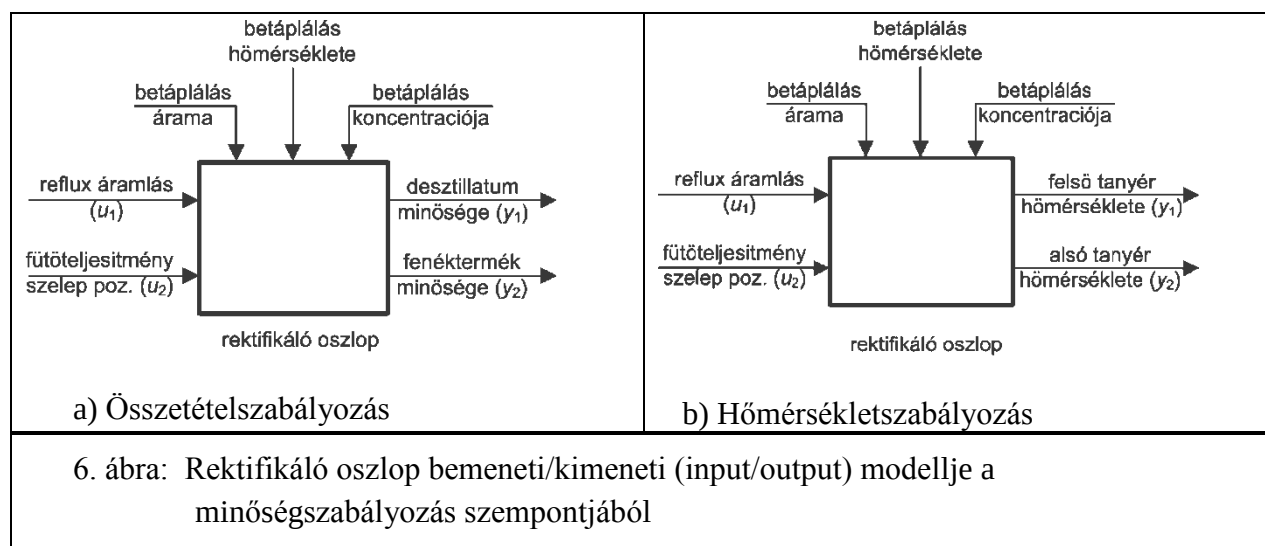
Az 5. ábra az általánosan alkalmazott energiaegyensúlyt biztosító szabályozási struktúrát mutatja. Látható, hogy mindkét beavatkozó változó mindkét szabályozott változót befolyásolja. A refluxáram növelése nemcsak a fejterméket, hanem a fenékterméket is hűti. A fűtőgőz áramát növelve nemcsak a fenéktermék hőmérséklete, hanem a fejtermék hőmérséklete is magasabb lesz. A szabályozás viszonylag gyors, de csatolt. A szabályozótervezéskor feladat a többváltozós (ebben az esetben két-bemenetű, két-kimenetű (TITO)) rendszer szabályozásának szétcsatolása. Azt kívánjuk elérni, hogy a desztillátum vagy a fenéktermék koncentráció alapértékének változtatása ne befolyásolja a másik, általa nem szabályozandó mennyiséget.



5. ábra: Rektifikáló oszlop a desztillátum koncentrációjának szabályozásával

Ennél jobb megoldás a szabályozásra az arányszabályozás alkalmazása, amit itt nem tárgyalunk.

A 6. ábra a rektifikáló oszlop bemeneti/kimeneti (input/output) modelljét mutatja az összetétel szabályozás szempontjából.



A szabályozott mennyiségek:

- a desztillátum összetétele (y_1)
- a fenéktermék összetétele (y_2)

A beavatkozó mennyiségek:

- a refluxáram (u_1)
- a fűtőtéljesítmény (u_2)

A főbb zavaró mennyiségek:

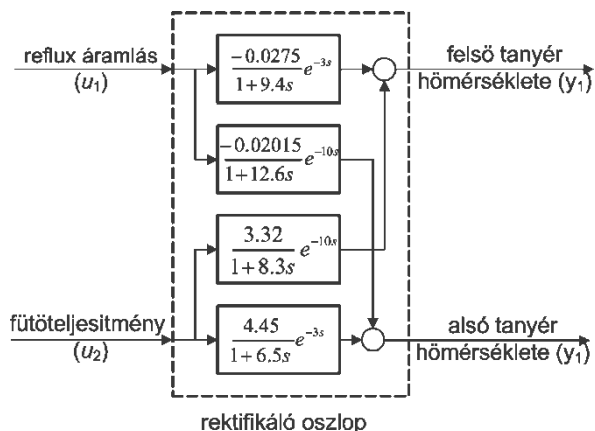
- betáplálás mennyisége (z_1)
- betáplálás hőmérséklete (z_2)
- betáplálás összetétele (z_3)

Az összetétel mérésére kromatográfot használnak, ami drága műszer és a mérés ideje kb. 15 perc. Ehelyett szokás az alsó és a felső (vagy azok közelében levő) két tányér hőmérsékletét szabályozni, mert a hőmérsékletmérés sokkal olcsóbb és a mért jel rögtön rendelkezésre áll. Miután a koncentráció a nyomástól is függ, ezért az úgynevezett nyomással kompenzált hőmérsékletet (PCT: Pressure Compensated Temperature) szabályozzák. Amennyiben a koncentráció mérésére kromatográf vagy laboratóriumi analízis is rendelkezésre áll, célszerű kaszkád szabályozást alkalmazni. A továbbiakban egy egyszerű rektifikáló oszlop modelljét vizsgáljuk, ahol a felső és az alsó tányérok nyomással kompenzált hőmérsékletei a szabályozott jellemzők: a desztillátum PCT-je és a fenéktermék PCT-je. A folyamat modelljét a 2. Táblázat adja meg. A részfolyamatokat elsőrendű holtidős modellekkel adjuk meg, amelyeknek erősítése K_p , holtideje T_d , időállandója pedig T .

2. Táblázat: A rektifikáló oszlop bemenet/kimeneti modellje

Beavatkozójel	Szabályozott jel	
	Desztillátum PCT (y_1)	Fenéktermék PCT (y_2)
Reflux (u_1)	$T_{d11} = 3 \text{ min}$ $K_{p11} = 0,0275^\circ\text{C}/(\text{t/d})$ $T_{11} = 9,4 \text{ min}$	$T_{d21} = 10 \text{ min}$ $K_{p11} = 0,0201^\circ\text{C}/(\text{t/d})$ $T_{21} = 12,6 \text{ min}$
Fűtőtéljesítmény (u_2)	$T_{d12} = 10 \text{ min}$ $K_{p12} = 3,32^\circ\text{C}/\text{MW}$ $T_{12} = 8,3 \text{ min}$	$T_{d22} = 3 \text{ min}$ $K_{p22} = 4,45^\circ\text{C}/\text{MW}$ $T_{22} = 6,5 \text{ min}$

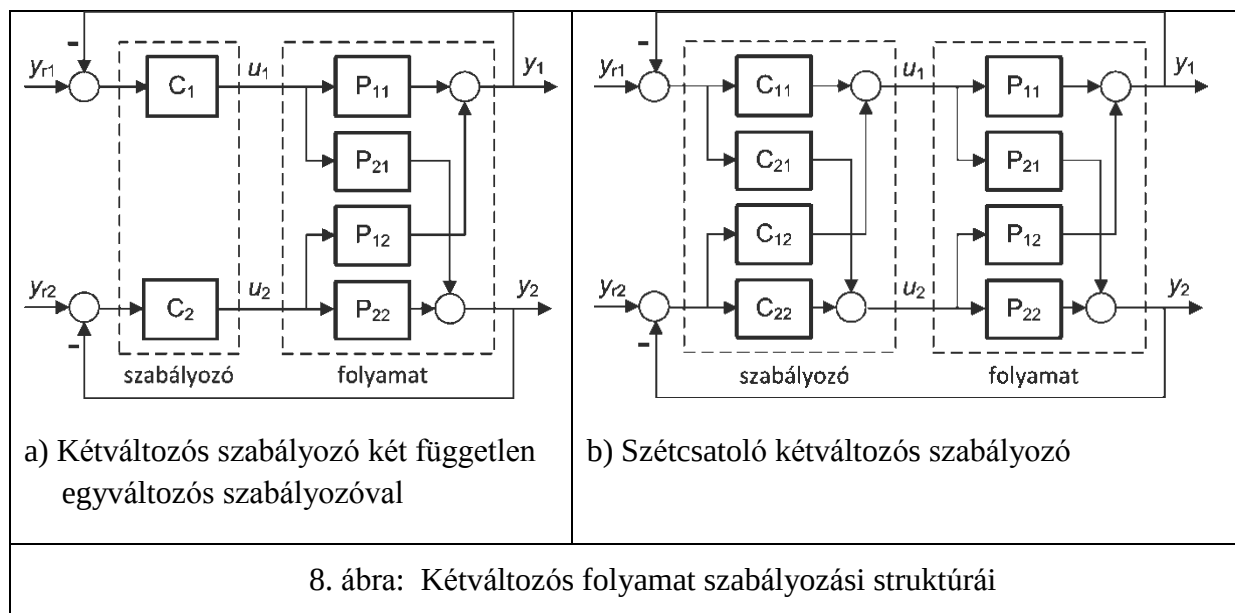
A 7. ábra mutatja a folyamatmodellt az átviteli függvényekkel felírva. (A Laplace transzformált alakban az idő percben értendő.)



7. ábra: Bemeneti/kimeneti folyamatmodell az átviteli függvényekkel (A Laplace transzformált alakban az idő percben értendő.)

5. A csatolás hatásának bemutatása a rektifikáló oszlop szabályozásánál

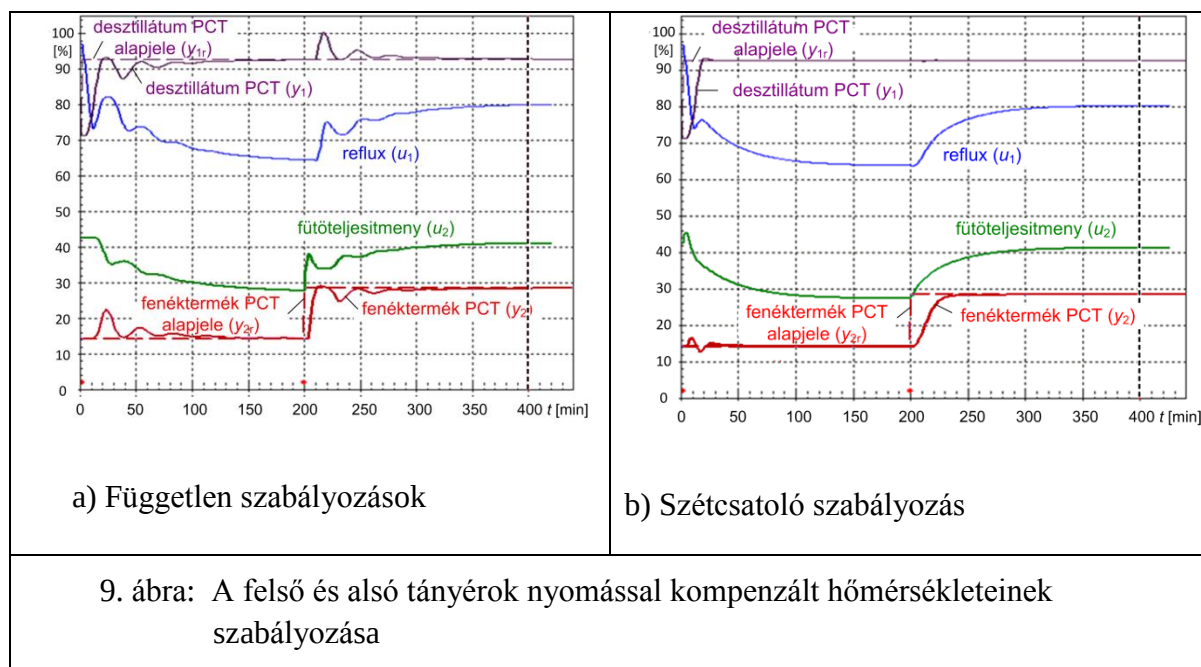
Hagyományosan a desztillátum és a fenéktermék minőségét (koncentrációját) egymástól függetlenül szabályozzák. A 8. ábra ezt az esetet mutatja, és bemutat egy szétcsatoló szabályozót is.



A szaggatott vonallal körülvett blokk a szabályozandó kétváltozós folyamatot illetve a kétváltozós szabályozót jelöli. A folyamat négy alrendszerre osztható. Az alrendszerek jelölésénél az első index a célváltozóra, ebben az esetben az első vagy a második kimenő változó minőségére utal. A második index a folyamat bemenetére, a megfelelő beavatkozó jelre utal. Az ábrán C jelöli a szabályozót és P a folyamatot.

Az alábbiakban a független és a szétcsatoló szabályozók működése közötti különbséget vizsgáljuk a rektifikáló oszlop egyszerűsített modellje alapján.

A 9. ábra mutatja a felső és alsó tányér nyomással kompenzált hőmérsékleteinek alakulását a független, illetve a szétcsatoló szabályozás esetén. Szabályozási algoritmusként egy költségfüggvényt optimalizáló prediktív szabályozást alkalmaztunk, amelynek lényegét a későbbiekben ismertetjük. A 9a ábra mutatja, hogy a független szabályozással a nem szabályozott mennyiség ingadozik, ha megváltoztatjuk a másik szabályozott mennyiség alapjelét. Ez azt jelenti, hogy a fenéktermék minősége nem marad állandó, ha csak a desztillátum minőség alapjelét változtatjuk, és vice versa. Ez a csatoltság majdnem teljesen kiküszöbölhető szétcsatoló szabályozó alkalmazásával, lásd a 9b ábrát.



Az összes szimulációnál a változókat relatív egységekben adtuk meg 0% és 100% között. A desztillátum PCT tartománya 50°C-tól 64°C-ig, a fenéktermék PCT tartománya 148°C-tól 162°C-ig terjed, a refluxáram tartománya 200 t/nap-tól 520 t/nap-ig, és a fűtőtéljesítmény 3 MW-tól 10 MW-ig terjed. Kezdetben a desztillátum PCT értéke 60°C és a fenéktermék PCT értéke 150°C volt. A $t=0$ min időpillanatban a desztillátum PCT alapértékét 60°C-ról 63°C-ra növeltük,

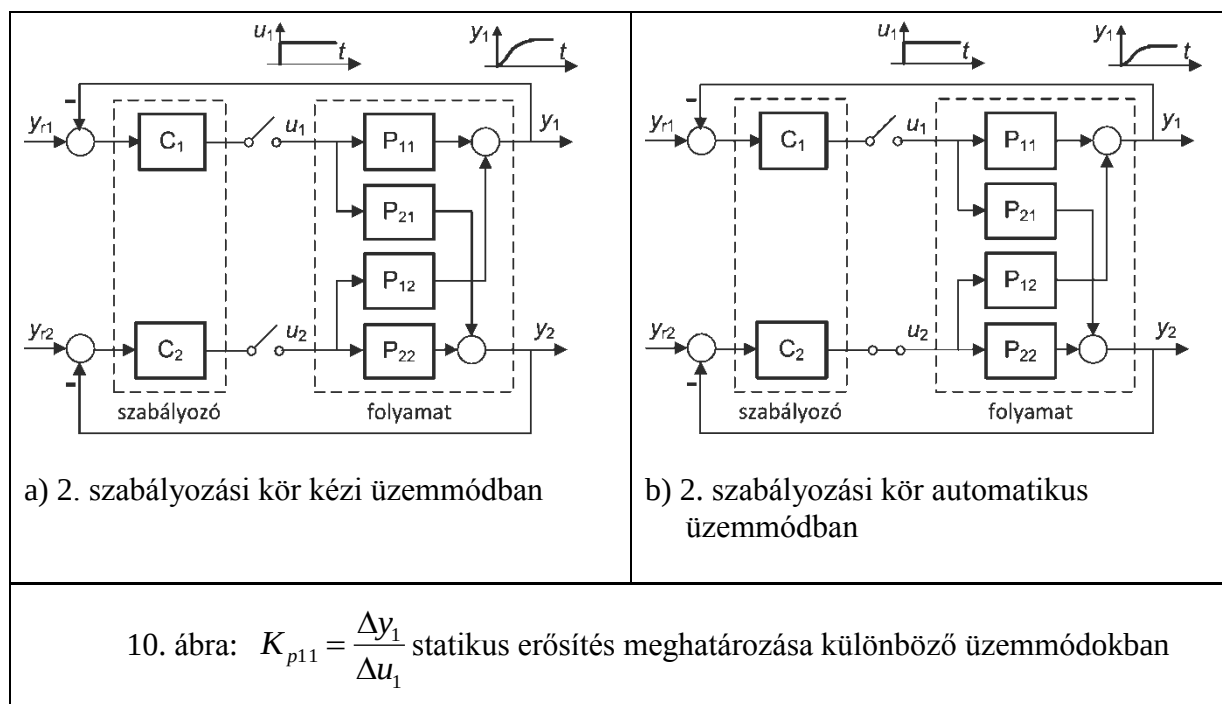
és a $t = 200$ min időpillanatban a fenéktermék PCT alapértékét növeltük meg 150°C -ról 152°C -ra.

Miért is jobb a szétcsatoló szabályozó, mint a két független szabályozó? Ennek oka az, hogy a szétcsatoló szabályozó kompenzálja a folyamatban meglévő csatoló hatást. Tekintsük például azt az esetet, amikor a desztillátum koncentrációjának alapértékét növeljük, ami a hőmérséklet alapértékének csökkenését jelenti. Az desztillátum C_1 szabályozója csökkenti a refluxáramot, ami csökkenti mind a desztillátum, mind pedig a fenéktermék hőmérsékletét. Hosszú időt vesz igénybe, amíg a fenéktermék C_2 minőségsszabályozója kompenzálja ezt a zavarást. Ha egy jól hangolt TITO szabályozót alkalmazunk, akkor a C_{21} szabályozó egyidejűleg csökkenti a reboiler fűtőteljesítményét, hogy kompenzálja a refluxcsökkenés hatását. (Megjegyezzük, hogy a szétcsatoló szabályozás C_{11} jelű szabályozója nem azonos a független szabályozás C_1 jelű szabályozójával.)

6. A csatoló hatás erősségének analitikus meghatározása

Az összetételek szabályozásának legkézenfekvőbb és legegyszerűbb módja két független szabályozó alkalmazása a 8a ábra szerint. A két szabályozókör a folyamatmodellben lévő csatoló tagokon keresztül zavaró módon kölcsönhatásban van. A zavaró hatás csökkenthető a két beavatkozó jel és a két szabályozott mennyiség megfelelő párosításával. Erre alkalmazhatjuk az ún. RGA (Relative Gain Array, relatív erősítési tényező) (Bristol, 1966) módszert.

Először tetszőlegesen párosítjuk a beavatkozó és a szabályozott mennyiségeket. (Például a desztillátum összetételét a refluxárammal, a fenéktermék összetételét pedig a fűtőteljesítménnyel szabályozzuk.) Ezután a P_{11} folyamat statikus erősítését két különböző esetre kell meghatározni.



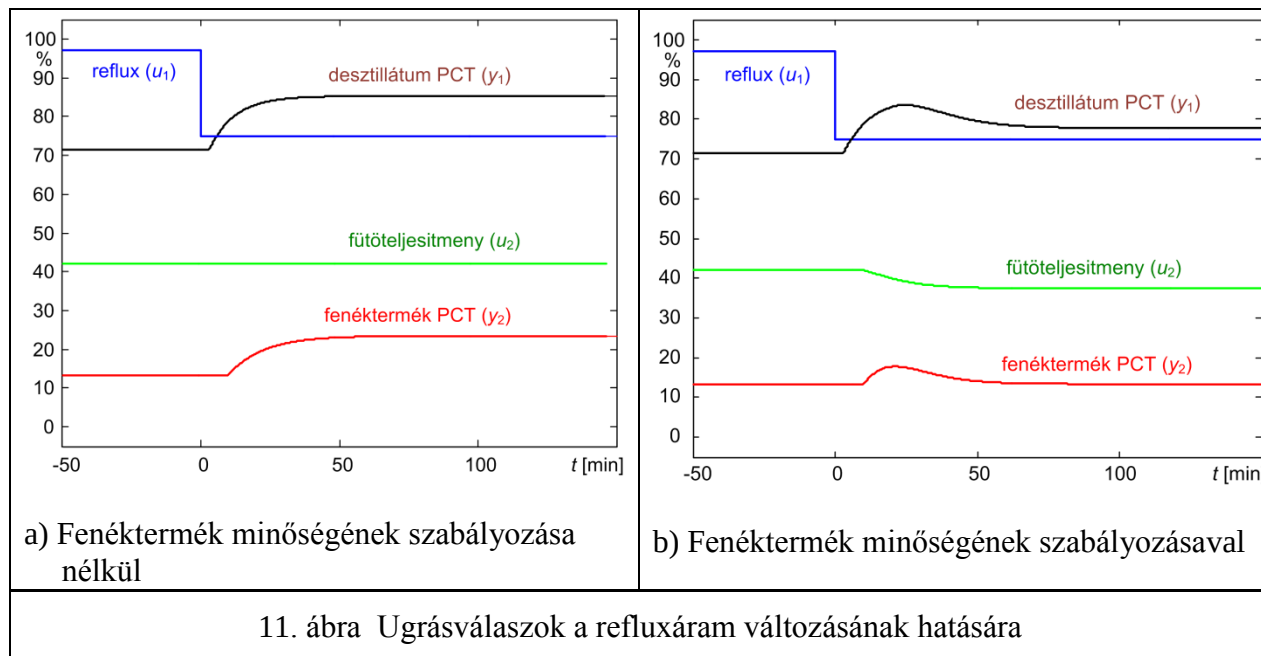
1. A 2. részfolyamat szabályozása kézi üzemmódban (vagyis az u_2 beavatkozójel változatlan marad, $\Delta u_2=0$).
2. A 2. részfolyamat szabályozása automatikus üzemmódban van, vagyis az y_2 szabályozott mennyiség állandó marad, $\Delta y_2=0$)

Ha a

$$\lambda_{11} = \frac{K_{p11,a \text{ 2. huroksab. nélkül}}}{K_{p11,a \text{ 2. huroksab. -val}}}$$

arány 1-gyel egyenlő, akkor nincs csatoló hatás és a két szabályozási kör egymástól függetlenül irányítható. Minden más esetben a szétcsatoló szabályozót célszerű alkalmazni. Ha mégis két független szabályozót alkalmazunk, figyelembe kell venni, hogy mindkét szabályozó mindkét lehetséges esetet tudja kezelni, azaz a másik szabályozó automatikus üzemmódban üzemel (normál eset), vagy a másik szabályozó kézi üzemmódban van (pl. érzékelő meghibásodás esetén).

A 11. ábra két szimulációs kísérlet eredményét mutatja. A változók tartománya ugyanaz, mint a 9. ábrán. Kezdetben a desztillátum PCT értéke 60°C és a fenéktermék PCT értéke 150°C volt, a megfelelő beavatkozó változók értékei állandósult állapotban: a refluxáram értéke 510,4 t/nap és a fűtőteljesítmény értéke 42 MW. A $t=0$ min időpillanatban a refluxáram értékét 510,4 t/nap értékről 440 t/nap értékre csökkentettük. Vizsgáltuk, hogyan, milyen dinamikával éri el a folyamat az új állandósult állapotot. A 11. ábra azt a két esetet mutatja, amikor a fenéktermék hőmérsékletét nem szabályoztuk, illetve szabályoztuk.



A relatív erősítés az alábbi összefüggéssel számítható:

$$\lambda_{11} = \frac{K_{p11, a \ 2. \text{ hurokszab. nélkül}}}{K_{p11, a \ 2. \text{ hurokszab. -val}}} = \frac{\frac{61,9406^{\circ}\text{C} - 60,0044^{\circ}\text{C}}{440 \text{ t/h} - 510,4 \text{ t/h}}}{\frac{60,8864^{\circ}\text{C} - 60,0058^{\circ}\text{C}}{440 \text{ t/h} - 510,4 \text{ t/h}}} = 2.2$$

A 2.2 érték azt mutatja, hogy az erősítés nagyobb, ha a fenéktermék minőségét nem szabályozzuk, például érzékelő hiba fellépésekor. Egy a normál esetre, vagyis mikor mindkét szabályozó működik, jól hangolt szabályozási kör belenghet, amennyiben a másik szabályozási kör kézi vezérlésbe kerül.

Van egy másik lehetőség is a relatív erősítési tényező kiszámítására, mégpedig a folyamat részfolyamatainak statikus erősítései alapján.

$$\lambda_{11} = \frac{1}{1 - \frac{K_{p12}K_{p21}}{K_{p11}K_{p22}}} = \frac{1}{1 - \frac{3.32^{\circ}\text{C/MW} \cdot (-0.0201^{\circ}\text{C}/(\text{t/d}))}{(-0.0275^{\circ}\text{C}/(\text{t/d})) \cdot 4.45^{\circ}\text{C/MW}}} = 2.2$$

A következő feladat annak ellenőrzése, hogy vajon a beavatkozó és a szabályozott mennyiségek fordított párosítása (vagyis a desztillátum minőségének szabályozása a fűtőtéljesítménnyel és a fenéktermék minőségének szabályozása a refluxárammal) megfelelőbb-e. Az RGA-módszer szerint ez a párosítás az alábbi relatív erősítést adja (Stephanopoulos, 1984):

$$\lambda_{11, \text{alternatív}} = 1 - \lambda_{11} = 1 - 2.2 = -1.2$$

Ezt a szabályozási struktúrát nem részesítjük előnyben, mivel a statikus erősítés előjelet vált attól függően, hogy a másik szabályozó automatikus vagy kézi üzemben van. Ez azt jelenti, hogy például egy érzékelő hibája esetén a szabályozás labilissá válhat.

A fentiek alapján a szétcsatoló szabályozás kedvezőbb a két független szabályozó alkalmazásához képest. A kétváltozós szétcsatoló szabályozó kézi tervezése helyett modell alapú predikciós szabályozót tervezünk, amely szétcsatoló tulajdonsággal is rendelkezik.

7. Modell alapú, többváltozós, predikciós szabályozás

Egy kétváltozós szétcsatoló szabályozó négy rész-szabályozóból áll, ezek közül kettő valóban szabályozza a kimenőjeleket, kettő pedig kompenzálja a folyamatban a zavaró csatoló hatásokat. Ez a lineáris szabályozó nem veszi figyelembe a korlátozó hatásokat. A korlátozás a beavatkozó jelben még csak figyelembe vehető, de a többi korlátozás a szabályozott és más változóknál ebben a struktúrában nehezen kezelhető. Ezért a következőkben a desztillációs oszlop szabályozásához egy másik eljárást, a modell prediktív szabályozást alkalmazzuk.

A módszer alapgondolata az, hogy a tekintett kimenő változókat nemcsak az aktuális időpontban vesszük figyelembe, hanem a jövő egy adott tartományában is. Értéküket valamilyen költségfüggvény szerint optimalizáljuk. Először a beavatkozó jelek sorozatát heurisztikusan vesszük fel és szimuláljuk a folyamat változóinak jövőbeli alakulását. Ha a szabályozott, a korlátozott és a bemeneti változók jövőbeni lefolyása nem kielégítő, új beavatkozó jel sorozatot próbálunk ki mindaddig, amíg a szabályozás viselkedése megfelelő nem lesz, azaz a kimenőjelek lefolyása megfelelő lesz és a korlátok teljesülnek.

A predikciós irányítást széleskörűen alkalmazzák a kőolajfinomításban, mivel a desztilláció viszonylag lassú folyamat, így a jövőbeni viselkedés többszörös szimulációja a szabályozás alatt elvégezhető. Általában azonban a szabályozáskor az alábbi kvadratikus költségfüggvényt minimalizáljuk (pl. Camacho et al., 2004; Haber et al., 2011).

$$J = \sum_{i=1}^{N_y} \sum_{n_{ei}=n_{e1i}}^{n_{e2i}} \frac{\lambda_{yi}}{\lambda_{yi}^*} [y_{ri}(k + d_i + n_{ei}) - \hat{y}_i(k + d_i + n_{ei} | k)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} \sum_{j=1}^{n_{ui}} \frac{\lambda_{ui}}{\lambda_{ui}^*} \Delta u_i^2(k + j - 1) \Rightarrow \underset{\Delta u_i}{MIN}$$

ahol

- $\Delta u(k)$: az i -edik beavatkozó változó,
- $\hat{y}_i(k + d_i + n_{ei} | k)$: az i -edik prediktált szabályozott jellemző
- $y_{ri}(k + d_i + n_{ei} | k)$: az i -edik alapjel, amelyet $n_{ei} + d$ lépéssel előre adunk meg, ahol
- d_i : a diszkrét holtidő az i -edik szabályozott jellemzőnél, és
- n_{ei} : a predikciós lépés az i -edik szabályozott jellemzőnél.

A prediktált szabályozott jellemzőknek tartalmazniuk kell a fő és segéd szabályozott jellemzőket és azon korlátozott változókat is, amelyek időlegesen megsérthetik korlátaikat.

A szabályozó hangoló paraméterei:

- N_y : a szabályozott jellemzők száma,
- N_u : a beavatkozó jelek száma,
- $n_{e2i} - n_{e1i} + 1$: az optimalizálásnál figyelembe vett predikciós tartomány (horizont) az i -edik szabályozott jellemzőnél,
- n_{ui} : az irányítási tartomány hossza az i -edik beavatkozó jelnél,
- λ_{yi}^* : az i -edik szabályozott vagy korlátozott jel skálázási tényezője,
- λ_{ui}^* : az i -edik beavatkozó jel skálázási tényezője,
- λ_{yi} : az i -edik szabályozott vagy korlátozott jel súlyozó tényezője,
- λ_{ui} : az i -edik beavatkozó jel súlyozó tényezője

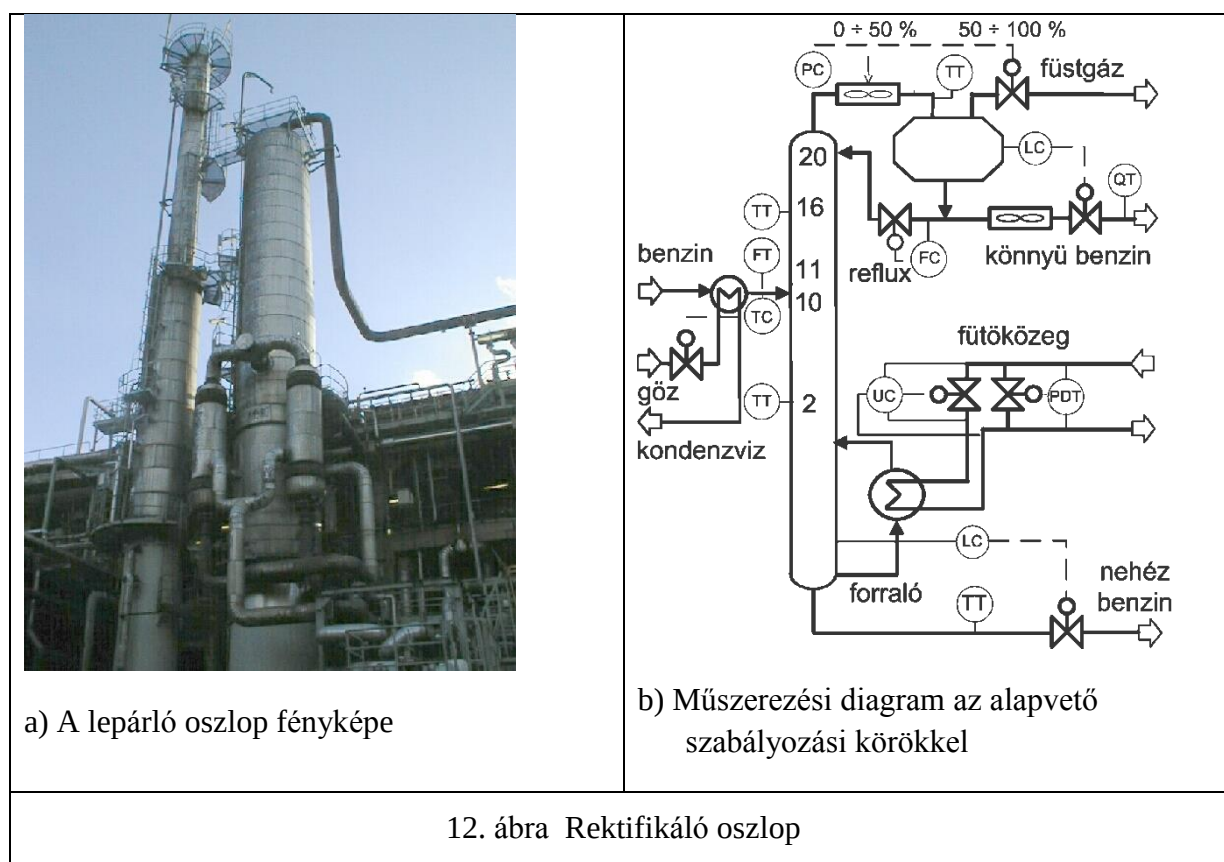
A skálázási tényező segítségével a különböző nagyságrendű jeleket normalizáljuk egy nagyságrendbe.

A gyakorlatban az alapérték helyett gyakran egy alapérték tartományt adnak meg. A költségfüggvény értéke zérus, ha valamennyi szabályozott jellemző a megadott tartományán belül van és nincs változás a beavatkozó jelekben.

Ezt a predikciós irányítási algoritmust sikeresen alkalmaztuk egy ipari rektifikáló oszlop szabályozására (Volk et al., 2005; Haber et al., 2011).

8. A kőolajipari rektifikáló oszlop leírása

A 12. ábra mutatja a szabályozandó desztillációs kolonnát, a részegységek kapcsolatát és a műszerezési diagramot.



A betáplálás a kőolajipari kőolajból érkező kőolaj. A desztillátum a könnyű benzin, amelynek forráspontja 30°C és 65°C között van. A fenéktermék a nehéz benzin, amelynek forráspontja 65°C és 180°C közé esik. A reflux PI áramlásszabályozási körrel befolyásolható. A nyomást a léghűtők ventilátorai dölésszögének állításával szabályozzuk. A szinteket a megfelelő termékáramokkal állítjuk be. A forraló teljesítményét a fűtőolaj árammal szabályozzuk.

9. Szabályozott változók és szabályozott segédváltozók, beavatkozó változók és zavarások

A szabályozás célja a változók értékeinek a megadott tartományokban tartása, illetve a termelési költségek minimalizálása.

Az állandó értéken tartandó vagy minimalizálandó lényeges változók:

1. *A desztillátum minősége*

A nehézbenzin koncentrációját a desztillátumban 2,5% alatt kell tartani. A koncentrációt az FBP (Final Boiling Point, végső forráspont) alapján vesszük figyelembe, azaz a termék forrási hőmérsékletét adjuk meg, amelynél a termék 99 %-a elpárolgott.

2. *A fenéktermék hőmérséklete*

A fenéktermék koncentrációja helyett a fenéktermék nyomással kompenzált hőmérsékletét szabályozzuk. Ennek a változónak a mérése sokkal olcsóbb az összetétel mérésénél.

3. *A kemence terhelése*

Az oszlop hőmérsékletét a reboileren átfolyó forró olaj mennyiségével szabályozzuk. A kemence működésének megfelelő biztosításához a fűtőközeg áramát állandó értéken tartjuk egy áthidalás (bypass) alkalmazásával.

4. *Az oszlop nyomása*

Az oszlop nyomását a lehetőségekhez képest minimális értéken kell tartani, hogy csökkentsük az energiafogyasztást, vagyis a forraló fűtését.

A fő szabályozott jellemzők:

1. A desztillátum minősége (amit az FBP értékével mérünk)
2. A fenéktermék nyomással kompenzált hőmérséklete
3. A fűtőtéljesítmény
4. Az oszlop nyomása, amit minimalizálni kell

Másodlagos szabályozott jellemzők:

1. A betáplálás hőmérsékletének meg kell egyeznie a betáplálás helyén lévő tányér hőmérsékletével, hogy ne zavarjuk meg a rektifikáló oszlop működését.
2. Egy belső kaszkád körrel szabályozzuk a felső (16.) tányér PCT változójának értékét. A PCT érték hamarabb mutatja a desztillátum minőségváltozását, mint a mért FBP érték.

10. Korlátozott jelek

A beavatkozó jelek a fizikai megvalósítás következtében korlátozottak. Ezeket a korlátokat nem szabad túllépni. A korlátozásokat már a tervezés folyamatában figyelembe kell venni.

A korlátozások két fajtája tehát:

1. „Kemény” korlátozás

Nem léphető túl például egy csővezetéken vagy szelepen áthaladó maximális átfolyó mennyiség

2. *“Lágy korlátozás”*, nem célszerű meghaladni, de rövid ideig meghaladható, például a megengedett légszennyezettség értéke. Ha ezt a működés során a rendszer meghaladja, büntetést kell fizetni, de a rendszert nem kell azonnal leállítani.

A kemény korlátokat a költségfüggvény optimalizálásánál vesszük figyelembe. A lágy korlátok a költségfüggvényben járulékos négyzetes tagokként szerepelhetnek.

A beavatkozó változók és azok „kemény” korlátai:

1. *A reflux alapszabályozójának alapértéke*
Minimum, maximum és változási sebesség
2. *A nyomás alapszabályozójának alapértéke*
Minimum, maximum és változási sebesség
3. *A betáplálás hőmérséklet szabályozójának szelepállása*
Minimum és maximum
4. *A fűtőolaj mennyiség szabályozójának a szelepe*
Minimum és maximum

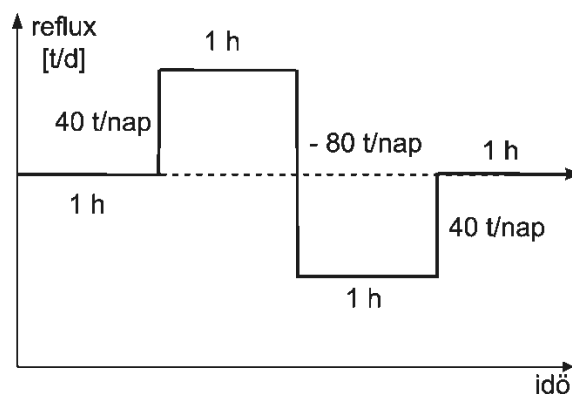
A változók „lágy” korlátai:

1. *A nyomásszabályozásnál a szelepállás*
Maximum korlát
2. *Fűtőközeg*
Minimum és maximum
3. *Az áthidaló szelep helyzete a fűtőközeg csövébenél*
Minimum és maximum
4. *A reflux áramlásszabályozó alapértéke*
Minimum és maximum
5. *A kemence terhelésének megsértése*
Maximum korlát a kemence túlmelegedésének elkerülésére

11. A folyamatmodell és a zavarmodell

Az előbbiek szerint meg kell adni a folyamat és a zavarás modelljét.

Tapasztalatunk szerint a folyamat nem tartja meg állandósult állapotát hosszabb ideig. Ezért kétértékű sztochasztikus vizsgálójel helyett néhány ugrásból álló vizsgálójelet alkalmaztunk a kísérleti identifikációhoz. A 13. ábra egy ilyen vizsgálójelet mutat, ami biztosítja azt, hogy a vizsgálat végén a munkapont nem változik.



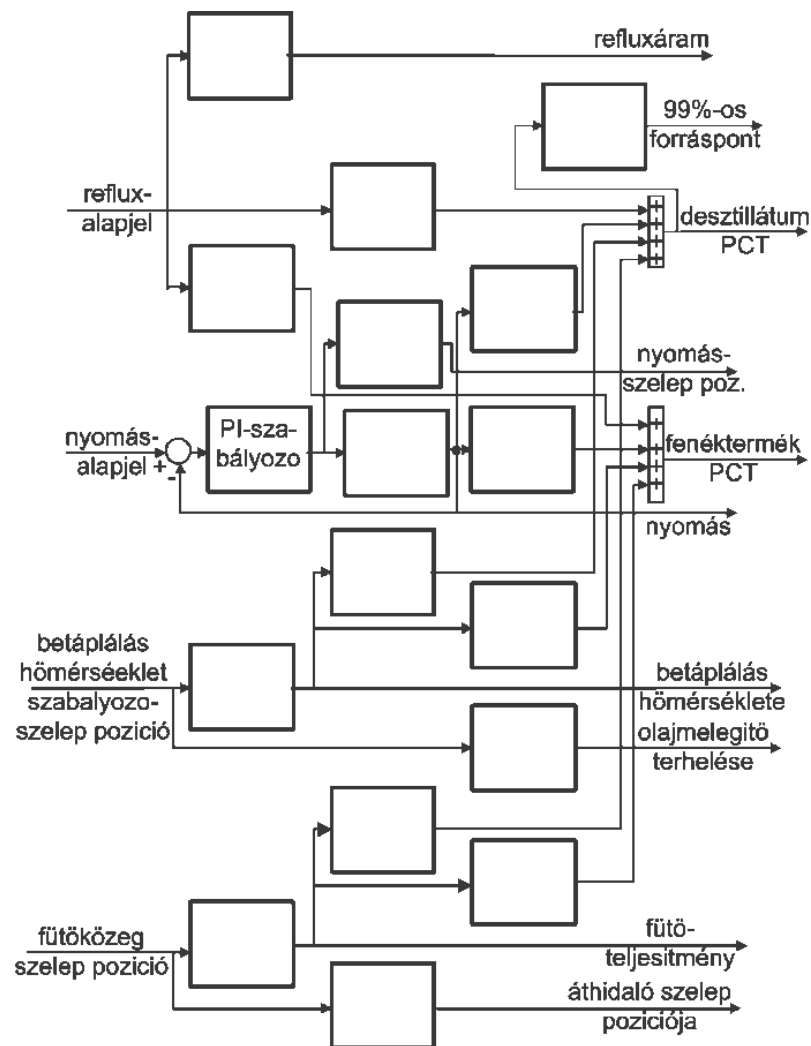
13. ábra Ugrásokból álló vizsgálójel (pl. a refluxáramhoz)

A mért rekordokból első és másodrendű holtidős átviteli függvények paramétereit identifikáltuk a legkisebb négyzetek módszerével. Az ugrás alakú vizsgálójelekre végzett vizsgálatok vették igénybe a legtöbb időt (néhány hetet) a szabályozótervezés során, mivel gyakran más mennyiségek is megváltoztak és ezzel megzavarták a mérést.

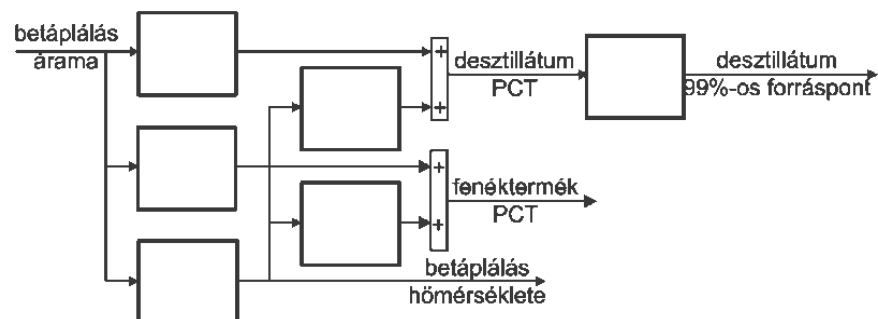
A kísérleti identifikáció eredményeként kapott folyamat- és zajmodell struktúráját a 14. ábra mutatja. Az elsőrendű folyamatok paramétereit (statikus erősítés, holtidő és időállandó) megtalálhatók a következő publikációkban (Volk et al., 2005; Haber et al., 2011). A másodrendű modellek nem adtak lényegesen jobb eredményeket, mint az elsőrendű modellek.

A folyamatmodell kissé eltér a szokásos bemeneti/kimeneti modellektől. A refluxmodellt, vagyis az összefüggést a reflux referencia értéke és a refluxáram között az eredő átviteli függvényével adtuk meg (statikus erősítése közelítőleg egységnyi, és időállandója kicsi), a nyomásszabályozási kört viszont részletesen ábrázoltuk a nyílthurkú nyomás modellel (a szelep helyzete és az oszlop nyomása között) és a PI szabályozóval. A részletes modellezésnek két előnye van:

- A nyomásszabályozó kör beavatkozó jele, a szelep helyzete modellezhető és felhasználható „lágymód” korlátozású változóként.
- A nyomást befolyásoló zavaró hatás gyorsan kompenzálható a helyi PI szabályozóval és a fenék- és a fejtermékeket szabályozó prediktív szabályozónak nem kell megváltoztatnia beavatkozó jeleit.



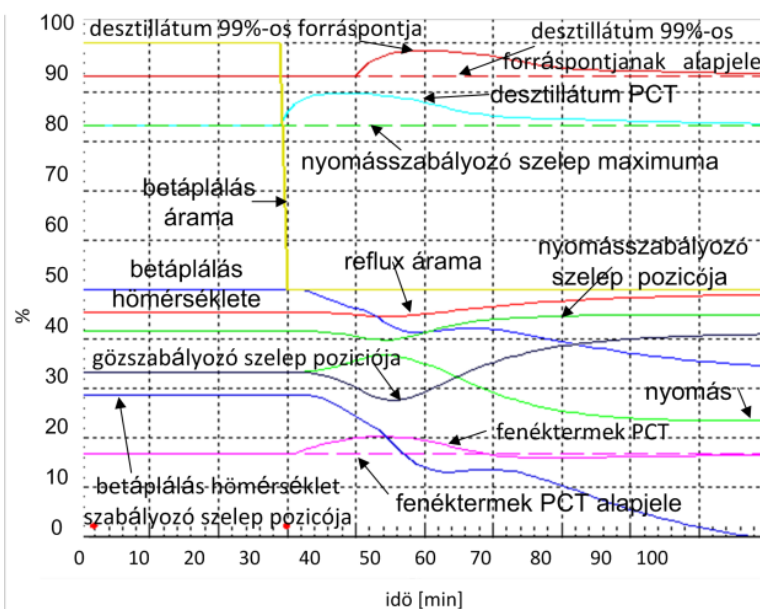
14/a ábra: Folyamatmodell



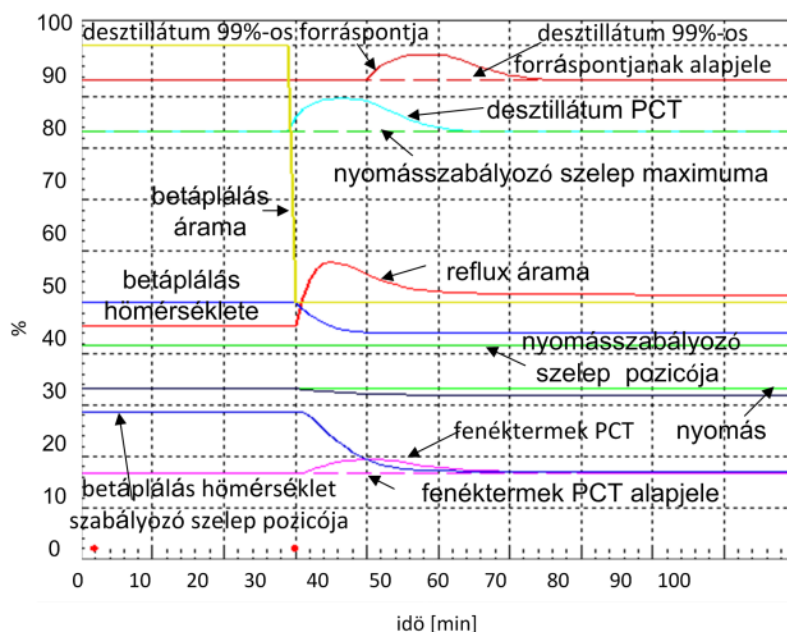
14/b ábra: Zajmodell

12. A szabályozás szimulációja és a szabályozó hangolása

A 15. ábra a szabályozás szimulációját mutatja, mikor a 30 min időpontban ugrásszerű csökkenés (zavarás) következik be a betáplálás áramában arra az esetre, amikor nem optimalizáljuk, illetve miután optimalizáltuk a súlyozó tényezőket a költségfüggvényben. (Induláskor valamennyi súlyozó tényezőt 1-re állítottuk be.) A súlyozó tényezők optimalizálásával, amint látható, a szabályozás gyorsabbá vált. A nyomás is csökken, mivel az optimalizáló szabályozó minimalizálja a nyomásszabályozó referencia értékét, miközben teljesíti a minőségi követelményeket.



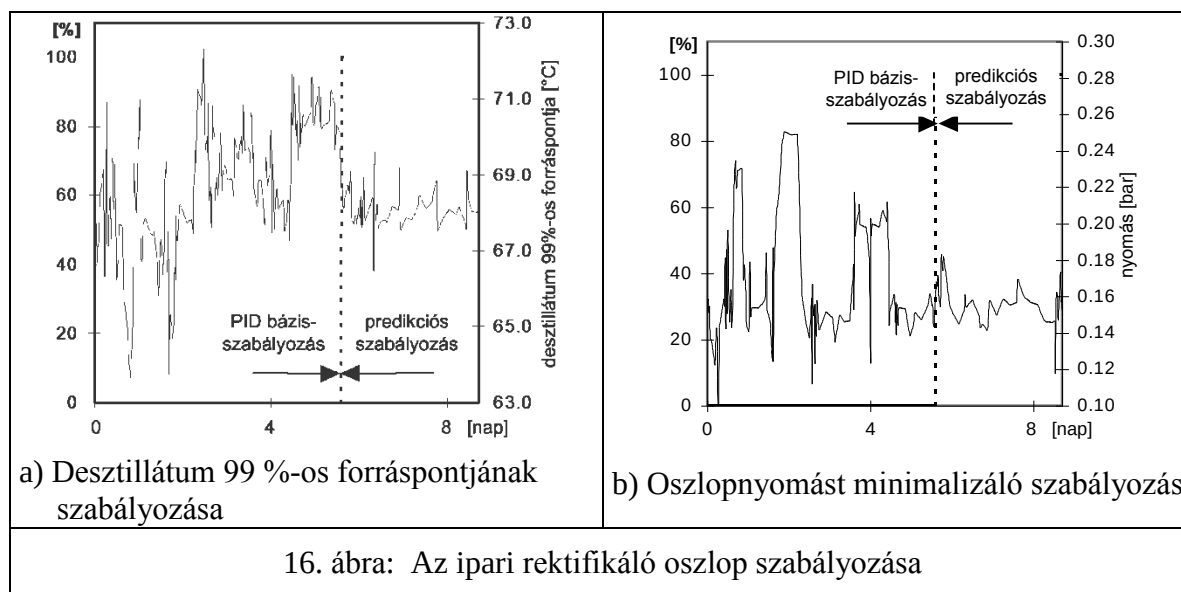
15/a ábra A szabályozás viselkedése betáplálás ugrásra a súlyozó tényezők optimalizálása nélkül



15/b ábra A szabályozás viselkedése betáplálás ugrásra a súlyozó tényezők optimalizálásával

13. Valós idejű szabályozás

A 16a és 16b ábrák a valós idejű szabályozás működését mutatják a predikciós irányítás bevezetése során. Az első 6,5 napon csak az alsórendű (PID) szabályozási körök működtek, azután kezdődött a predikciós szabályozás. Az ábrákon a predikciós szabályozás viselkedése látható működésének első 3,5 napja során.



A fő szabályozott jellemzőt, a fejtermék 99%-os forráspontját csaknem konstans értéken tartjuk, és a predikciós szabályozás eredményeként az ingadozás csúctól csúcsig értéke kb. 3:1 arányban csökkent. Az oszlop nyomása átlagértékben jelentősen csökkent és a nyomást kiegyensúlyozottabban szabályozzuk (a csúctól csúcsig értékek arányának javulása jobb mint 4:1).

14. Összefoglalás

A desztilláció alapvető technológia a kőolajfinomítóknál. Megmutattuk, hogy a kőolajelegyet szétválasztó kolonnában különböző szabályozási stratégiák alkalmazhatók, ha csupán egy koncentrációt (rendszerint a desztillátum összetételét) illetve, ha mindkét koncentrációt (a fej- és a fenéktermék koncentrációját) szabályozzuk. Az első esetben egyváltozós szabályozást alkalmaznak. A második esetben egy csatolt kétváltozós (TITO) folyamatot kell szabályozni és ebben az esetben a szabályozó tervezése bonyolult. A két beavatkozó mennyiség (a fűtés és a reflux áram) és a két szabályozandó koncentráció megfelelő párosítása nem triviális feladat. Az RGA-módszert alkalmaztuk a kedvezőbb szabályozási struktúra kiválasztására. Még ebben az esetben is a két szabályozó nem tervezhető egymástól függetlenül, iteratív beállításra van szükség. Csupán két szabályozó alkalmazásával a csatoló hatás a lepárló oszlopban nem kompenzálható, ami azt jelenti, hogy mind a fűtés, mind pedig a reflux áram változása mindkét szabályozandó koncentráció értékét befolyásolja. A kétváltozós folyamatot a négy szabályozót tartalmazó szétcsatoló szabályozóval szabályozhatjuk optimálisan. Mivel ennek a komplex szabályozónak a hangolása nehéz feladat, prediktív szabályozást alkalmaztunk, amely egy kvadratikusan célfüggvényt minimalizál.

A szabályozás a desztillátum és a fenéktermék koncentrációját a megkívánt állandó értéken tartja, miközben a gyakorlat számára fontos fizikai korlátozásokat is kielégíti. A szabályozó képes a mért zavarások kiküszöbölésére is, például a zavarás előreecsatolásával a betáplálás mennyiségének változása kompenzálható. Egy belső változó mérésével (fejtermék PCT-értéke) és prediktív kaszkád szabályozás alkalmazásával a fő szabályozott mennyiség (a fejtermék 99%-os forráspontjának) szabályozása meg jobbá és gyorsabbá tehető.

A szabályozási eltérések és a beavatkozó változók növekményei súlyozó tényezőinek durva hangolása fizikai megfontolások alapján, a finomhangolás pedig iteratív módon szimulációkkal történt. Néhány diagram mutatja a szabályozott és a beavatkozó változókat a predikciós szabályozás alkalmazása előtt és után. Láthatóan a predikciós szabályozással a koncentráció ingadozása csökkent. Továbbá egy alacsonyabb nyomás referencia érték beállítása kisebb fűtőteltjesítményhez vezetett, ami energiamegtakarítást jelent. Az áthidaló szelepnél a nyomáskülönbség állandó értéken tartásával a kemence terhelése állandó értéken tartható, és ezáltal a kemence működése is kiegyenlítettebbé vált.

A fejtermék 99%-os forráspontja varianciájának csökkentésével a referenciaérték növelhető és így nehezebb (olcsóbb) összetevők is eladhatók lesznek a desztillátumban. Ezt a következő számítás mutatja. Feltételezzük, hogy a betáplálás árama 3136 t/nap. A 3. Táblázat megadja a fejtermék 99%-os forráspontjának középértékét és szórását a PI szabályozással illetve a prediktív szabályozás alkalmazása esetére. A szabályozott mennyiség szórásának csökkenése miatt az

alapérték növelhető. Ezzel több fenéktermék és kevesebb fejtermék állítható elő, ahogy ezt a 4. Táblázat mutatja. (Ez azt jelenti, hogy több nehéz összetevő adható el a fejtermékkel.)

3. Táblázat: Desztillátum minősége különböző szabályozási módszerek esetén

Szabályozás	99%-os forráspont	
	Átlagérték [°C]	Szórás [°C]
PI	60,857	1,959
Prediktív	60,89	0,9795

4. Táblázat: Termékminőségek különböző szabályozási módszerek esetén

Szabályozás	Desztillátum [t/nap]	Fenéktermék [t/nap]
PI	263,4	2873
Prediktív	267,2	2869,2

A jobb szabályozással a fejtermék 3.8 t/nap értékkel növelhető. A desztillátum nyáron 27€/t-val és télen 9 €/t-val drágább, mint a fenéktermék, így átlagban $(27 + 9)/2 = 18$ €/t-val értékesebb mint a fejtermék. Feltéve, hogy a prediktív szabályozás az idő 90%-ban működik, akkor a nyereség (desztillátum többlettermelés) x (ártöbblet) x (elérhetőség) x (365 nap/év): $3.8 \text{ t/nap} \times 18 \text{ €/t} \times 0.9 \times 365 \text{ nap/év} = 22.47$ ezer €/év.

A lineáris szabályozási algoritmus a munkapont körüli kb. 10%-os változások mellett érvényes. Más munkapontban új modellt kell becsülni és új (lineáris) szabályozó hangoló paramétereket kell meghatározni. Természetesen egy nagyobb munkaponti tartományra érvényes nemlineáris szabályozót is lehet alkalmazni, de annak a tervezése és beállítása komplikáltabb, mint egy lineárisé.

Az ipari gyakorlatból vett fenti esettanulmány bemutatja, milyen minőségjavulás érhető el többváltozós predikciós szabályozással egy összetett költségfüggvény minimalizálásával és korlátozások figyelembevételével.

15. Hivatkozások

Bristol, E.H. (1966). On a new measure of interaction for multivariable process control. IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-11, No. 133.

Buckley, P., J. Shunta, W. Luyben (1985). Design of Distillation Column Control Systems, Elsevier.

Camacho, E. F., A.C. Bordons (2004). Model Predictive Control, 2nd ed. Springer.

Haber, R., R. Bars, U. Schmitz (2011). Predictive Control in Process Engineering. From the Basics to the Applications. Wiley-VCH, Weinheim, Germany.

Stephanopoulos, G. (1984). Chemical process control. An introduction to theory and practice. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

Volk U., D.-W. Kniese, R. Hahn, R. Haber, U. Schmitz (2005). Optimized Multivariable Predictive Control of an Industrial Distillation Column Considering Hard and Soft Constraints, Control Engineering Praxis, Vol. 13, 913-927.