خلاصهٔ فنی

مبحث الکترولایزر

سلول الکترولیز غشایی کلر ـ آلکالی (فناوری Uhde) — اصول کارکرد، طراحی و شیمی فرایند

این گزارش خلاصه‌ای از فصل «الکترولیز» سند فنی پیوست‌شده (دفترچهٔ بهره‌برداری واحد کلر ـ آلکالی) است که اصول ساختار، عملکرد الکتروشیمیایی و پارامترهای کلیدی الکترولایزرهای غشایی را شرح می‌دهد.

۱. مشخصات کلی سالن سلول

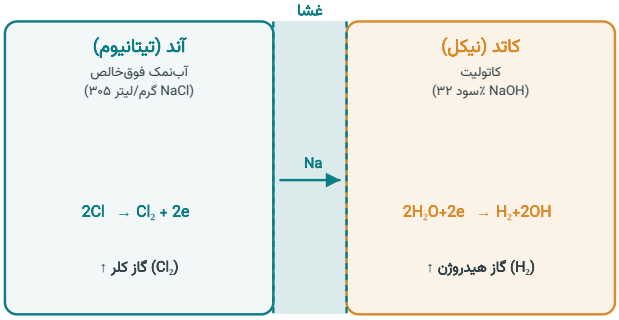
هر خط تولید شامل ۱۲ الکترولایزر از نوع دوقطبی **UHDE BM 2.7-163** است. هر الکترولایزر از ۱۶۳ «عنصر تکی» (Single Element) تشکیل شده که در ۱۲ رَک سلولی چیده شده‌اند (ظرفیت اسمی هر الکترولایزر تا ۱۶۸ عنصر با احتساب جای عناصر یدکی).

پارامتر	مقدار
ظرفیت هر سالن سلول	۱۰۰۰ تن در روز ۱۰۰٪ NaOH
نوع سلول	غشایی، دوقطبی، جریان طبیعی (Uhde)
تعداد الکترولایزر در هر خط	۱۲
تعداد عنصر تکی در هر الکترولایزر	۱۶۳ (+۵ جای یدکی)
سطح فعال غشا	۲٫۷۲ متر مربع
جنس آند / روکش	تیتانیوم / پوشش فلز نجیب
جنس کاتد / روکش	نیکل (مِش) / پوشش فلز نجیب

منبع: بخش ۶.۲.۱، جدول مشخصات فنی سالن سلول و الکترولایزر تکی — سند پیوست

۲. اصل کارکرد یک عنصر الکترولیز

هر عنصر تکی از دو نیمه‌محفظهٔ آند و کاتد تشکیل شده که با یک غشای تبادل‌یونی از هم جدا می‌شوند. آب‌نمک فوق‌خالص (Ultra Pure Brine) وارد محفظهٔ آند شده و گاز کلر در آنجا تولید می‌شود؛ در محفظهٔ کاتد نیز از محلول کاتولیت، گاز هیدروژن و سود سوزآور (NaOH) تولید می‌شود. غشا فقط اجازهٔ عبور یون‌های Na^+ و مقداری آب را به سمت کاتد می‌دهد.



- غشا نسبت به مایع و گاز نفوذناپذیر است و فقط کاتیون‌های Na+ را عبور می‌دهد.
- جلوگیری از بازگشت یون‌های OH به سمت آند، بازده جریانِ فرایند را بالا می‌برد.
- ترکیب شیمیایی غشا (بر پایهٔ فلوئوروکربن) محدودهٔ غلظت بهینهٔ کاتولیت را تعیین می‌کند (معمولاً حدود ۳۲٪ NaOH).
- عمر مفید اقتصادی غشا حداقل ۳ سال برآورد می‌شود.

منبع: بخش‌های ۶.۲.۱ و ۶.۲.۲.۴ — اصل کارکرد الکترولیز و اصول فرایند غشایی

۳. واکنش کلی و پتانسیل‌های تجزیه

واکنش کلی الکترولیز آب‌نمک برای تولید سود، کلر و هیدروژن به‌صورت زیر است:

$$NaCl + H_2O \rightarrow NaOH + \tfrac{1}{2}Cl_2 + \tfrac{1}{2}H_2$$

این واکنش در دو نیم‌واکنش جداگانه در آند و کاتد رخ می‌دهد:

$$\text{آند: } Cl \rightarrow \tfrac{1}{2}Cl_2 + e \quad (E^\circ = 1.358V)$$

$$\text{کاتد: } H_2O + e \rightarrow \tfrac{1}{2}H_2 + OH \quad (E^\circ = 0V)$$

پتانسیل تفکیک (Decomposition Voltage) کمینه ولتاژی است که برای آغاز واکنش در جریان صفر لازم است و طبق معادلهٔ نرنست به غلظت و دما وابسته است؛ در دمای عملیاتی حدود ۹۰ درجهٔ سانتی‌گراد برابر با تقریباً **۲٫۲۴ ولت** است.

۴. واکنش‌های جانبی و افت راندمان

- بخشی از کلر تولیدشده در آب حل شده و به اسید هیپوکلرو (HOCl) و سپس یون هیپوکلریت (OCl) تبدیل می‌شود.
- ترکیب این یون‌ها می‌تواند کلرات (ClO_3) تولید کند که راندمان سلول را کاهش می‌دهد؛ نرخ تشکیل آن به فشار جزئی کلر، غلظت Cl و pH آنولیت بستگی دارد.
- واکنش جانبی مهم دیگر تولید اکسیژن در آند است؛ با وجود پتانسیل استاندارد پایین‌تر آن (۱٫۲۲۹ ولت)، اضافه‌ولتاژ بالای اکسیژن روی پوشش آند مانع تولید گستردهٔ آن می‌شود.
- اسیدی‌کردن آب‌نمک ورودی (با HCl) می‌تواند اکسیژن و کلرات تولیدی را کاهش دهد، اما خطر اسیدی‌شدن بیش‌ازحد آنولیت (کمتر از pH=۲) به غشا آسیب می‌رساند.

۵. نیاز به برق و نرخ تولید (قانون فارادی)

طبق قوانین فارادی، مقدار مادهٔ تولیدشده در الکترودها مستقیماً با مقدار جریان عبوری متناسب است. هر ۹۶۴۸۵ آمپر-ثانیه (۱ فارادی) بار الکتریکی، به‌طور نظری تولید می‌کند:

ماده	مقدار به‌ازای هر کیلوآمپر-ساعت (kAh)
کلر (Cl_2)	حدود ۱۳۲۳ گرم (۰٫۴۱۱ مترمکعب در شرایط استاندارد)
هیدروژن (H_2)	حدود ۳۷٫۶ گرم (۰٫۴۱۱ مترمکعب در شرایط استاندارد)
سود سوزآور (۱۰۰٪ NaOH)	حدود ۱۴۹۲ گرم

۶. ولتاژ عملیاتی سلول

ولتاژ عملیاتی هر عنصر تکی به‌مراتب بالاتر از ولتاژ تجزیهٔ تئوری است و از مجموع اجزای زیر تشکیل می‌شود: ولتاژ تجزیه، اضافه‌ولتاژ آند و کاتد، افت اهمی ساختار فلزی، افت اهمی الکترولیت و گاز، و افت ولتاژ غشا. نمونهٔ عددی برای یک عنصر Uhde در چگالی جریان ۵ کیلوآمپر بر مترمربع و دمای ۹۰ درجه:

جزء ولتاژ	مقدار تقریبی
ولتاژ تجزیه	۲٫۲۴ ولت
اضافه‌ولتاژ آند	۰٫۰۶ ولت
اضافه‌ولتاژ کاتد	۰٫۰۷ ولت
افت ساختاری و تماسی	۰٫۰۴ ولت
افت الکترولیت و گاز	۰٫۱۳ ولت
افت غشا	۰٫۴۸ ولت
مجموع ولتاژ سلول	**حدود ۳٫۰۲ ولت**

رابطهٔ ولتاژ سلول با چگالی جریان در بازهٔ بالای ۱٫۵ کیلوآمپر بر مترمربع تقریباً خطی است: $U = U_0 + k \cdot i$ که برای عناصر دوقطبی Uhde به‌طور نمونه $U_0 \approx ۲٫۳۹$ ولت و $k \approx ۰٫۱۲۶$ ولت·م²/کیلوآمپر است.

۷. کنترل فشار سلول

حفظ اختلاف فشار ثابت میان محفظهٔ کاتد و آند برای ایمنی عملیات ضروری است؛ فشار هیدروژن همواره حدود ۴۰ میلی‌بار بالاتر از فشار کلر نگه داشته می‌شود تا غشا تنها به سمت آند تکیه کند. در صورت افزایش بیش‌ازحد فشار، شیرهای خودکار و شیرهای اطمینان گاز را به سمت سیستم دِکلریناسیون یا دودکش هیدروژن هدایت می‌کنند.

۸. حالت‌های عملیاتی الکترولایزر

سند مرجع، بهره‌برداری از هر الکترولایزر را در قالب حالت‌های تعریف‌شدهٔ A تا F (شامل خالی/پر، سرد/گرم، بارِ کم تا بارِ کامل) توصیف می‌کند و برای هرکدام رویهٔ گام‌به‌گام راه‌اندازی اولیه، افزایش/کاهش بار، جداسازی و ادغام با مدار اصلی، خاموشی عادی، خاموشی اضطراری و عیب‌یابی (نظیر افت غلظت آب‌نمک یا قطع کامل برق) ارائه شده است.

این گزارش خلاصه‌ای از فصل «الکترولیز» سند فنی پیوست‌شده است و صرفاً برای مرور سریع مفاهیم تهیه شده؛ برای جزئیات کامل رویه‌های عملیاتی و ایمنی به سند اصلی مراجعه شود.