

صنعت شکر در قرن بیستم در اروپا: پیشرفت فناوریانه و راهکارهای آینده نگر

امیرمهدی ماهرخ

کارشناسی علوم و مهندسی صنایع غذایی ، گروه صنایع غذایی، دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

چکیده:

هدف تحقیق: این تحقیق به بررسی تکامل فرآیندهای تولید شکر از قرن نوزدهم تا قرن بیستم و تأثیر فناوریهای نوین بر افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و حفاظت محیط زیست می‌پردازد. هدف اصلی آن تحلیل تحولات تاریخی در استخراج و تصفیه شکر از چغندر و نیشکر، معرفی فناوریهای پیشرفته مانند کروماتوگرافی بستر متحرک شبیه‌سازی شده (SMB) و ترکیب فرآیندهای غشایی، و ارائه راه‌حل‌هایی برای چالش‌های پیش‌روی کشورهای در حال توسعه است. روش تحقیق: مطالعه حاضر به روش تحلیل تاریخی-تطبیقی انجام شده و با استفاده از داده‌های تجربی، فرمول‌های علمی، و بررسی نوآوری‌های صنعتی مرتبط با استخراج و تصفیه شکر تدوین شده است. همچنین، جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی فناوریهای مورد استفاده در صنایع شکر کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه بررسی شده‌اند. نتایج: تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که پیشرفت فناوریهای استخراج و تصفیه شکر، مانند میکروفیلتراسیون، کریستالیزاسیون سرد و SMB منجر به افزایش راندمان، کاهش مصرف انرژی، کاهش ضایعات و تولید محصولات با کیفیت بالاتر شده است. در کشورهای در حال توسعه، پیشنهاد استفاده از فناوریهای متناسب با شرایط اجتماعی و اقتصادی، مانند کارخانه‌های کوچک مقیاس و تولید شکر، می‌تواند به کاهش شکاف اقتصادی بین کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه کمک کند. نتیجه‌گیری: تکامل فناوریهای تولید شکر نشان‌دهنده تأثیر مثبت تحقیق و توسعه بر بهره‌وری و پایداری زیست‌محیطی این صنعت است. استفاده از فناوریهای نوین در کشورهای توسعه‌یافته باعث بهبود چشمگیر کیفیت و کاهش هزینه‌ها شده، در حالی که تطبیق این فناوریها با نیازهای محلی کشورهای در حال توسعه می‌تواند به اشتغال‌زایی، کاهش فقر و تقویت صادرات کمک کند. افزایش همکاری‌های بین‌المللی برای انتقال دانش و حمایت از کشورهای در حال توسعه، از عوامل کلیدی در دستیابی به توسعه پایدار در صنعت شکر است.

کلید واژه: SMB، شکر، کروماتوگرافی، میکروفیلتراسیون، فناوری استخراج

۱- مقدمه:

تکامل فرآوری شکر در قرن بیستم: پایه‌های فرآوری شکر از اواخر قرن نوزدهم توسعه یافت، به‌ویژه به لطف شیمیدان‌های برجسته آن دوره (کلایزن، هرتزفلد، گروت، استانک، سیلار، ووهریزک). اهمیت پیشرفت‌های صورت‌گرفته در فرآوری شکر چغندری در فرانسه را می‌توان از افزایش ظرفیت کارخانه‌ها دریافت. در حالی که در حدود سال‌های ۱۹۰۰-۱۹۰۵ حدود ۳۰۰ کارخانه با ظرفیت متوسط ۲۰۰ تا ۲۵۰ تن در روز فعال بودند و کمتر از یک میلیون تن شکر تولید می‌کردند، تنها ۴۰ کارخانه باقی ماندند که ظرفیت آن‌ها بین ۸۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ تن در روز بود و سالانه ۵ میلیون تن شکر تولید می‌کردند. بلافاصله پس از جنگ جهانی اول (۱۹۱۸-۱۹۱۴)، بازسازی کارخانه‌های تخریب‌شده همراه با افزایش قابل توجه ظرفیت صورت گرفت و در برخی موارد، کارخانه‌های مرکزی با واحدهای استخراج اقماری راه‌اندازی شدند تا مشکلات حمل‌ونقل چغندر قند به کارخانه حل شود. پس از جنگ جهانی دوم، کمبود و هزینه بالای نیروی کار منجر به راه‌اندازی فرآیندهای پیوسته و تعمیم کنترل خودکار در صنعت شد. آن دوره، دوره‌ای از تشدید تحقیقات بنیادی و کاربردی بود. کمیسیون بین‌المللی فنی قند(صنعت شکر) (C.I.T.S) در سال ۱۹۴۹ راه‌اندازی شد. کارگاه‌های آزمایشی مانند G.T.S (گروه فنی کارخانه‌های قند(صنایع شکر)) در فرانسه تأسیس شدند. طراحی تجهیزات برای دستیابی به کارایی بهتر، استفاده هرچه بیشتر از فرآیندهای پیوسته و کنترل متمرکز کامپیوتری اصلاح شد. حتی نمونه‌برداری و تحلیل‌های آزمایشگاهی نیز به طور فزاینده‌ای خودکار شده‌اند. صنعت تولید شکر، به‌عنوان یکی از صنایع کلیدی در زنجیره غذایی جهانی، در طول قرن‌های گذشته شاهد تحولات گسترده‌ای بوده است. مسئله اصلی این تحقیق، بررسی روند تکامل فرآیندهای تولید شکر از چغندر و نیشکر با تمرکز بر فناوری‌های نوین، کاهش مصرف انرژی، و افزایش بهره‌وری است. افزایش تقاضا برای محصولات باکیفیت و کاهش اثرات زیست‌محیطی، از مهم‌ترین چالش‌هایی است که این صنعت با آن روبه‌رو بوده است. اهمیت و ضرورت تحقیق: این تحقیق از آن جهت اهمیت دارد که تولید شکر یکی از منابع اصلی انرژی در رژیم غذایی جهانی محسوب می‌شود و نقش مهمی در اقتصاد کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه ایفا می‌کند. در حالی که کشورهای پیشرفته از فناوری‌های پیشرفته برای بهبود فرآیندهای تولید و کاهش ضایعات استفاده می‌کنند، بسیاری از کشورهای در حال توسعه همچنان با روش‌های قدیمی و ناکارآمد فعالیت دارند. بنابراین، ضرورت دارد که روندهای فناوری و اقتصادی این صنعت مورد بررسی قرار گیرد تا راهکارهایی برای بهبود کارایی و کاهش شکاف اقتصادی ارائه شود. دلایل انتخاب موضوع تحقیق: تحولات سریع فناوری، افزایش تقاضای جهانی برای شکر، و نیاز به سازگاری با استانداردهای زیست‌محیطی، محققان را به بررسی این موضوع سوق داده است. همچنین، مسائل اجتماعی و اقتصادی در کشورهای در حال توسعه، مانند نیاز به اشتغال‌زایی و حفظ منابع طبیعی، توجه بیشتری به انتخاب روش‌های پایدار تولید شکر را می‌طلبد. هدف تحقیق: این تحقیق با هدف شناسایی و تحلیل روندهای تاریخی و نوآوری‌های فناوری در فرآیندهای تولید شکر و ارائه راهکارهای مناسب برای کشورهای در حال توسعه تدوین شده است. ساختار مقاله: در این مقاله، ابتدا به بررسی پیشرفت‌های تاریخی در فرآیندهای استخراج و تصفیه شکر پرداخته می‌شود. سپس فناوری‌های نوین، از جمله میکروفیلتراسیون، کریستالیزاسیون سرد و کروماتوگرافی بستر متحرک شبیه‌سازی شده (SMB) بررسی خواهد شد. در ادامه، راهکارهای پیشنهادی برای کشورهای در حال توسعه و نقش همکاری‌های بین‌المللی در بهبود صنعت شکر مطرح می‌شود. در نهایت، با جمع‌بندی نتایج، پیشنهادهایی برای توسعه پایدار این صنعت ارائه خواهد شد.

۲- روش تحقیق:

تحلیلی-توصیفی

۳- یافته های پژوهش:

۳-۱- استخراج

پیشرفت‌هایی در اصلاح نژاد گیاهان از اواخر قرن نوزدهم حاصل شد که باعث افزایش درصد قند در چغندر قند از ۸.۸ درصد به ۱۸.۸ درصد در بازه زمانی ۱۸۳۸ تا ۱۹۰۸ گردید. سال‌های پایانی قرن به مطالعات بحث‌برانگیز در زمینه اصلاح ژنتیکی اختصاص یافت. وینینگر و کوبادینوف (۱۹۷۱) پیشنهاد کردند که ارزش تکنولوژیکی چغندر قند از طریق فرمولی برای خلوص عصاره (شربت) و قند ملاس، بر اساس آگاهی از غلظت مواد غیرقندی ملاس‌زا (مولد ملاس) مانند $K^+ Na^+$ و α -نیترोजن، محاسبه شود. در این فرمول، R به معنای محتوای قند چغندر است.

خلوص عصاره:

$$[1] P = 99,36 - 0,1427 \times (K + Na + \alpha N) \times 100 / R$$

قند موجود در ملاس (به عنوان تابعی از ضریب قلیائیت Ka)

$$[2] Ka = (Na + K) / \alpha N$$

برای:

$$Ka > 1,8; Sm = 0,3492 \times (K + Na)$$

$$Ka \leq 1,8; Sm = 0,6285 \times \alpha N$$

ضرایب این معادلات بر اساس ترکیب مواد غیرقندی هر محصول چغندر قند تنظیم می‌شوند.

۳-۲- ارزیابی کیفیت نیشکر

ارزیابی کیفیت نیشکر از نظر میزان قند (Pol) قابل استخراج از سال ۱۸۸۸ در اندونزی آغاز شد. یکی از فرمول‌هایی که همچنان استفاده می‌شود، فرمول وینتر است که میزان قند تجاری قابل بازیابی (Ws) را به عنوان تابعی از (Sj) و بریکس (B) محاسبه می‌کند: این فرمول به تولیدکنندگان کمک میکند تا بازده قند قابل استخراج را با دقت بیشتری پیش بینی کنند و فرآیند تولید را بهینه کنند

$$[۳] Ws = S - ۰,۴ (B - S)$$

البته این فرمول‌ها مقادیر مطلق قند استخراج‌شده را نشان نمی‌دهند و در کشورهای مختلف متفاوت هستند. هرچند گرفتن نمونه‌ای نماینده از نیشکر دشوار است، هاگوت (۱۹۷۴) پیشنهاد می‌کند که آنالیز مستقیم یک نمونه کوچک پس از استخراج عصاره با استفاده از آسیاب سه غلطکی آزمایشگاهی یا پرس هیدرولیک انجام شود. میزان قند قابل بازیابی (R.S.) با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$[۴] RS = k \times (۱ - ۱,۴۵ \times f) \times (۵ - ۰,۳ \times B)$$

که در آن:

k: ضریب کارایی (بازدهی)

f: میزان فیبر

S: میزان قند در عصاره اولیه

B: ماده خشک عصاره اولیه

۳-۳- استخراج شکر

استخراج شکر از فرآیند خیساندن خلال چغندر قند به فرآیند انتشار جریان مخالف تکامل یافت. این تغییرات باعث صرفه‌جویی در زمان و افزایش کارایی شد، به‌علاوه حذف فاضلاب‌های آلاینده و بازیافت آب فرآیندی را نیز به همراه داشت.

انتشار در ظروف دسته‌ای به‌طور معمول در کارخانه‌های تولید شکر چغندری در نیمه اول قرن بیستم استفاده می‌شد. بررسی کتاب‌های درسی اوایل قرن بیستم نشان می‌دهد که هزینه نیروی کار چقدر اهمیت داشته است. برای مثال، یک کارخانه تولید شکر با ظرفیت ۲۰۰ تن در روز، برای استفاده از سیستم انتشار (دیفیوزر) دسته‌ای به پرسنل زیر نیاز داشت:

- ۱ اپراتور دسته
- ۱ دستیار جوان
- ۲ کارگر برای تفاله‌ها (فشردن تفاله‌ها با پا پس از پر کردن ظرف)

- ۱ کارگر غیرماهر برای تمیزکاری
- ۱ دستیار جوان برای انجام وظایف مختلف

بهینه‌سازی استخراج شکر از طریق انتشار از دهه ۱۹۳۰ مورد مطالعه قرار گرفت. فرمول معروف سیلین (۱۹۳۷) در دهه‌های بعد تنها تغییرات جزئی پیدا کرد. و همچنان یکی از پایه‌های اساسی برای پیشرفت‌های بعدی در استخراج شکر محسوب می‌شود.

۳-۱-۳-۳- استخراج شکر: فرمول‌ها و دستاوردها

در معادله زیر:

$$[^\circ] N(n^{-1}).\log(n^{-1} + C/C_0)/(n.C/C_0) = \gamma = A.L.Z.\theta.$$

- **A:** ثابت
- **L:** طول خلال چغندر (٪ متر)
- **Z:** مدت زمان دیفیوز (دقیقه)
- **θ:** ضریب دما
- **γ:** ثابت موقت
- **C:** مقدار قند از دست‌رفته در تفاله
- **C₀:** محتوای قند چغندر (٪)
- **S:** نسبت عصاره‌گیری (حجم عصاره یا شربت) (لیتر عصاره به ازای هر کیلوگرم چغندر)
- **n:** مقدار برابر با ۰.۹۳ + ۰.۴۳ C₀ (S)

هزینه نیروی کار و پیشرفت‌های تکنولوژیکی عامل اصلی دستاوردهای متعددی در زمینه دیفیوزرهای پیوسته بوده‌اند. با این حال، دستگاه‌های اولیه مشکلات زیادی داشتند که شامل (الف) مشکلات مکانیکی ناشی از عملکرد مداوم و (ب) مشکلات شیمیایی مانند خوردگی، کف‌سازی، رشد باکتریایی و تخمیر بودند. با گذشت زمان و با توسعه فناوری، این مشکلات به تدریج برطرف شد، که منجر به افزایش بازده و کاهش هزینه‌های عملیاتی شد.

خیلی زود مزایای انتشار پیوسته غیرقابل انکار شدند:

- کنترل خودکار فرآیند
- بهینه‌سازی استخراج
- کاهش نیروی کار به نظارت ساده از یک ایستگاه کنترل متمرکز
- افزایش ظرفیت استخراج‌کننده‌ها

- صرفه جویی در انرژی (از طریق تبادل حرارت بین شربت خام/خلال ها و شربت/آب داغ)
- بازیافت آب فشاری به همراه آب تازه

در اواخر قرن بیستم انواع مختلفی از استخراج کننده های چغندر معرفی شدند که بر اصول مختلفی استوار بودند (Van der Poel et al., ۱۹۹۸)

۱. انتقال کنترل شده عصاره و خلال ها: استخراج کننده RT ، استخراج کننده De Smet
۲. انتقال کنترل شده خلال ها و انتقال غیر کنترل شده عصاره: استخراج کننده silver chain-type ، استخراج کننده Olier
۳. انتقال غیر کنترل شده عصاره و خلال ها: استخراج کننده های برجی (towers extractors) مانند: (BMA، Buckau Wolf) استخراج کننده های شیب دار (DDS، نوع شیب نقره ای).

۳-۲-۳- استخراج شکر از نیشکر

استخراج شکر از نیشکر همچنان از روش خرد کردن در یک سری آسیاب های غلطکی استفاده می کند. شستشوی جریان مخالف نیز در این فرآیند به کار گرفته می شود. کل فرآیند آسیاب کردن در طی ۲۰ دقیقه تکمیل می شود. بهبودهایی در سطح تغذیه آسیاب ها صورت گرفته است، مانند استفاده از آسیاب شش غلطکی در استرالیا. کارایی استخراج با افزایش ضریب بازجذب همراه با سرعت سطح غلطک ها افزایش یافته است. کیفیت تفاله تغذیه شده، دما و غلظت مایع جذبی (Imbibition Liquid) می توانند بر ضریب جذب را تحت تأثیر بگذارند، که این ضریب نیز به سطح جذب حساس است. علاوه بر آسیاب های کلاسیک نیشکر، از انتشار پیوسته جریان مخالف نیز از دهه ۱۹۶۰ برای استخراج شکر نیشکر استفاده شده است. تفاوت های اصلی بین استخراج چغندر قند و نیشکر از طریق انتشار عمدتاً مربوط به آماده سازی مواد خام است. آماده سازی مناسب نیشکر برای پاسخگویی به الزامات استخراج مؤثر در دستگاه های انتشار نیشکر ضروری است. انواع مختلفی از دستگاه های استخراج نیشکر وجود دارند که اکثر آن ها از انتشار چغندر قند الهام گرفته شده اند و معمولاً توسط همان تأمین کنندگان دستگاه های انتشار چغندر قند مانند: (DDS، BMA، De Smet) ساخته می شوند.

۳-۴- تصفیه شربت

در کارخانه های شکر چغندری، استفاده از آهک و دی اکسید کربن از سال ۱۸۵۹ بر اساس روشی که توسط شیمیدان های فرانسوی پریر و پوسوز طراحی شد، آغاز گردید. در ابتدای قرن بیستم، آهک زنی گسترده به همراه کربناسیون دو مرحله ای انجام می شد. بیشتر عملیات (مانند پر کردن، تخلیه، حرارت دهی و غیره) به صورت دستی انجام می شد. نیمه دوم قرن بیستم دوران کارخانه های مدرن بود که از دستاوردهای فناوری شکر نیشکری در ایالات متحده الهام گرفتند. در این دوران دستگاه اشباع کننده کربناسیون بنینگ با سیستم بازیافت خارجی عصاره، به طور همزمان عصاره خام پیش گرم شده و شیر آهک را دریافت می کرد، که این کار تخریب قلیایی هگزوزها را محدود کرده و باعث بهبود ته نشینی و فیلتراسیون می شد. ته نشین کننده استاتیک دور-الیور شفاف سازی خوبی را فراهم می کرد. عصاره شفاف شده به دومین کربناسیون هدایت می شد، جایی که مازاد CaO آزاد حذف شده و لجن روی فیلترهای (vacuum-drum) پیوسته تصفیه می شد.

۳-۴-۱- تعدیلات اصلی در تصفیه عصاره چغندر قند عبارتند از:

- آهک زنی پیشرفته عصاره خام که از تخریب رسوب طی آهک زنی گسترده جلوگیری می کند.
- تخریب کامل هگزوزها (با غلظت کم در عصاره چغندر قند) طی تماس با pH بالا در مخازن آهک زنی که از واکنش های قهوه ای شدن غیر آنزیمی در حضور غلظت بالای آمینواسیدها جلوگیری می کند.
- بازیافت لجن غلیظ شده در آهک زنی اولیه.

نوآوری های مهم در زمینه تصفیه عصاره که به کارایی بهتر کمک کردند عبارتند از:

- عملکرد منظم کل زنجیره تصفیه با کنترل خودکار.
- بهینه سازی کیفیت عصاره رقیق از طریق تعیین دقیق pH، دما و قلیائیت بهینه (در مقیاس آزمایشگاهی-پایلو).
- کنترل متمرکز کامپیوتری و کاهش نیروی کار.
- کاهش هزینه های نگهداری.

در این میان، افزایش قابل توجهی در ظرفیت تجهیزات نیز حاصل شد که هزینه های تصفیه را کاهش داد. روش غالب تصفیه شامل آهک زنی اولیه است با قلیائیت ۲.۸ تا ۳ گرم بر لیتر است. با این حال، کل آهک استفاده شده به دلیل بازیافت لجن اولین مرحله کربناسیون در آهک زنی اولیه کمتر از ۱۵ گرم در لیتر است. به این ترتیب، مصرف سنگ آهک بسته به نسبت عصاره گیری، در حدود ۱۹ تا ۲۵ کیلوگرم به ازای هر تن چغندر قند باقی می ماند (Bonnenfant, ۱۹۹۹)، مصرف آهک در دهه های اخیر به دلیل بهبود کیفیت چغندر و پیشرفت های تکنولوژیکی به طور منظم کاهش یافته است.

۳-۴-۲- تصفیه عصاره در تولید شکر نیشکر

در تولید شکر از نیشکر، روش تصفیه ای که برای چندین قرن استفاده می شد، روش ساده زدودن ناخالصی (Defecation) بود (Honig, ۱۹۵۳). این روش شامل افزودن مقدار کمی شیر آهک برای رسیدن به pH نزدیک به ۷.۰ در دمای حدود ۱۰۳ درجه سانتی گراد و سپس افزودن یک عامل منعقد کننده برای بهبود شفاف سازی است. مواد ته نشین شده در دستگاه شفاف کننده با تفاله نیشکر ریز (Bagacillo) مخلوط شده و در فیلترهای دروم چرخشی (rotary drum) شیرین زدایی می شود. این روش اولیه به شکل های مختلفی تغییر داده شد که شامل تغییر در توالی آهک زنی، حرارت دهی و افزودن فسفات ها یا عوامل منعقد کننده قبل از شفاف سازی بود. روش تصفیه آهک-دی اکسید کربن که در چغندر قند استفاده می شد، برای شفاف سازی عصاره های نیشکر نیز به کار گرفته شد. مصرف آهک در این روش کمتر از چغندر قند است، اما مصرف انرژی در سیستم تصفیه دو مرحله ای کربناسیون دو گانه بیشتر از روش ساده زدودن ناخالصی (رسوب دهی) است (Van der Poel et al., ۱۹۹۸).

۳-۴-۳- نوآوری های دیگر در تصفیه عصاره

برخی از نوآوری های دیگر در تصفیه عصاره بر اساس استفاده از رزین های تبادل یونی است. این تکنیک ها برای کاهش کلسیم، رنگبری یا تبادل یون Mg^{2+} (که کمتر ملاسزا است) با یون های Na^{+} و K^{+} (که ملاسزا هستند) به کار گرفته می شوند. با این حال، این روش ها معایبی دارند، زیرا مقادیر زیادی فاضلاب تولید می کنند.

۳-۵- تبخیر شربت

تجهیزات و فرآیندهای تبخیر در کارخانه‌های شکر چغندری و نیشکری مشترک هستند. در ابتدای قرن بیستم، اصول اولیه تبخیر شناخته شده بودند:

- تبخیر چندمرحله‌ای
- تأمین بخار برای فرآیند
- تراکم بخار حرارتی

در طول این قرن پیشرفت‌های قابل توجهی حاصل شد:

- مطالعه دقیق سیستم حرارتی کارخانه‌های شکر برای دستیابی به صرفه‌جویی در انرژی
- بهبود طراحی تبخیرکننده‌ها و مبدل‌های حرارتی (مانند فیلم نزولی و تبخیرکننده دو بدنه)
- افزایش تعداد مراحل تبخیر (از ۲ یا ۳ در ابتدا به ۶ یا ۷ مرحله، با دمای ورودی بخار بالاتر و مرحله آخر تحت خلأ)
- افزایش راندمان با استفاده از فشرده‌سازی بخار (عمدتاً در کارخانه‌های شکر چغندری)
- بهینه‌سازی سیستم حرارتی شامل آب متراکم‌شده و دیگر جریان‌های حرارتی
- به دلیل حساسیت عصاره نیشکر به حرارت، کاهش زمان در تبخیرکننده اول، محدودیت دمای جوش یا فشار، تبخیر تحت خلأ با حذف افت (تلفات) کندانسور
- رعایت مقررات انتشار آلاینده‌ها در دیگ‌های بخار (SOx، NOx، HCl، HF، CO، خاکستر معلق و دوده)
- درک بهتر از دلایل تشکیل رنگ (هیدرولیز ساکارز، تخریب حرارتی، زمان نگهداری، حذف افزودن SO₂ به دلایل فنی یا مقرراتی)
- حذف رسوبات با استفاده از تمیزکاری شیمیایی یا افزودنی‌های فرآیندی (مانند پلی‌الکترولیت‌ها)
- غلیظ‌سازی عصاره غلیظ برای اهداف ذخیره‌سازی یا تغذیه کریستالیزور (صرفه‌جویی در زمان طی فرآیند کریستال‌سازی (کریستالیزاسیون) و کاهش مصرف بخار)
- اتوماسیون پیشرفته با سیستم‌های کامپیوتری: دقت بیشتر در اندازه‌گیری، نظارت بر فرآیند از اتاق‌های کنترل متمرکز، کاهش نیروی کار و افزایش ایمنی.

۳-۶- کریستالیزاسیون

در ابتدای قرن بیستم، جداول حلالیت، افزایش نقطه جوش به عنوان تابعی از غلظت و دیگر خواص فیزیکی و شیمیایی محلول‌های ساکارز شناخته شده بودند. با این حال، استخراج بلورهای خالص از محلول‌های شکر فنی به عنوان یک تخصص ویژه به دست افراد ماهر و دست‌چین شده انجام می‌شد. هنر کارگر ماهر (pan man) این بود که اشباع بیش از حد را تشخیص دهد و رشد بلورها (کریستال‌ها) بدون تشکیل ذرات ریز است.

در طول قرن بیستم، پیشرفت‌های عمده‌ای حاصل شد:

- دانش بهتر از حلالیت ساکارز در آب و خواص محلول‌های اشباع
- مطالعه سیستماتیک از نرخ رشد بلورها به عنوان تابعی از فوق اشباع بودن، خلوص و دما
- دانش بهتر از اثر ناخالصی‌ها بر رشد بلورها و مورفولوژی (morphology) آنها
- مطالعاتی در مورد ساختار مولکولی محلول‌های اشباع و سینتیک هسته‌زایی انجام شد
- در کارخانه‌های شکر چغندری، حلالیت در محلول‌های ناخالص با دقت رضایت‌بخشی با استفاده از تغییر ضریب اشباع (یا حلالیت) به عنوان تابعی از نسبت ناخالصی/آب (مستقل از دما) تعیین می‌شود
- در کارخانه‌های شکر نیشکری، میزان بالای شکر معکوس و یون‌های معدنی پیش‌بینی ضریب حلالیت را دشوار می‌کند.

این کار در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه ساتورسکوپ انجام می‌شود. تعیین نقطه اشباع به این روش امکان کالیبراسیون تقریبی دستگاه‌های کنترل را فراهم می‌آورد.

- کریستالیزاسیون تبخیری پیوسته اختراع شد که مزایایی مانند جریان ثابت، دمای پایین‌تر بین بخار گرم و ماگما، کنترل آسان‌تر فرآیند، و هزینه‌های پایین‌تر سرمایه‌گذاری و عملیات دارد. اما معایبی همچون ضریب تغییرات زیاد (C.V)، بلورها، تشکیل رسوبات و نیاز به تولید دانه‌ها در خارج از کریستالایزر وجود دارد.

با وجود ظهور پاتیل‌های تحت خلأ پیوسته عمودی که بهبودهایی از جمله کاهش مصرف انرژی، بازدهی بالاتر بلور، کنترل بهتر فرآیند (کراس و کوردل، ۱۹۹۷) را به همراه داشت، پاتیل‌های خلأ دسته‌ای همچنان ترجیح داده می‌شوند، زیرا کیفیت تجاری بهینه‌تری از شکر (توزیع اندازه دانه‌ها و C.V) تولید می‌کنند. در میان پیشرفت‌های اخیر در کریستالیزاسیون، می‌توان به تسلط بر فرآیند حساس **دانه بندی** اشاره کرد. این فرآیند بر اساس اصل نظری معرفی تعداد ذرات مورد نظر به همان اندازه که در پایان جوشیدن پس از رشد بلورها یافت می‌شود، استوار است. روش‌های مختلف دانه بندی به‌تازگی توسعه یافته‌اند. ماگما، دانه وارد کارخانه شکر چغندری CSM در Breda (Van der Poel, ۱۹۸۲) شد و سپس بهبود یافته و کامپیوتری شد (Van der Poel et al., ۱۹۸۵). فرآیند دیگری در موسسه براونشفايگ با همکاری BMA (Eichhorn, ۱۹۹۱) توسعه یافت. عملیات شامل دانه بندی شربت اشباع شده در دمای بالا با SLURRY (متوسط اندازه ۱۰ میکرومتر) است. کریستالیزاسیون سرمایشی به رشد این ذرات کمک می‌کند. ماگمای به‌دست آمده به‌عنوان پایه‌ای در کریستالایزر استفاده می‌شود که باید شرایط یکنواختی اندازه و عدم وجود عدم وجود توده‌های ترکیبی (conglomerates) را داشته باشد. برای پاتیل‌های خلأ پیوسته، نیاز به ماگمای دانه است.

پیشرفت جالب دیگر در زمینه مصرف کم محصول است. به دلیل درک بهتر پارامترهایی که باید بهینه شوند، به‌ویژه در مورد عملکرد صحیح سانتریفیوژهای کم‌محصول، امکان تعیین نقاط تنظیم دقیق برای اشباع و ویسکوزیته مایع (شیره) مادر و تراکم در طول زنجیره کریستالیزه‌های کم‌محصول فراهم شده است. این کار با استفاده از مرحله پیش سانتریفیوژ برای کاهش درصد بلورها به مقدار بهینه انجام شد. تجهیزات در این مرحله نیز به‌شدت بهبود یافته‌اند به دلیل جایگزینی زنجیره‌های کلاسیک چندگانه کریستالیزرها با کریستالیزرهای خلأ عمودی با ظرفیت بالا.

۳-۷- کنترل خودکار

قرن نوزدهم با از بین رفتن آسیاب‌های قدیمی و ظهور کارخانه‌های مرکزی در بیشتر مناطق کشت نیشکر به پایان رسید. تنها کارخانه‌های بزرگ قادر به خرید ماشین‌آلات پیشرفته و دستگاه‌های کنترل همراه با استخدام کارکنان مهندسی متخصص بودند. یکی از کارگاه‌هایی که برای انجام خودکار آن بسیار حیاتی بود، فرآیند کریستالیزاسیون بود. ویژگی‌های مختلفی به‌عنوان متغیرها در حلقه‌های کنترل برای کنترل خودکار جوشیدن پاتیل استفاده می‌شدند. به‌عنوان مثال، رسانایی الکتریکی که به‌عنوان مرجع برای فوق‌اشباع استفاده می‌شد، از سال ۱۹۳۲ در جاوا (Java) (Honig, ۱۹۵۹) پذیرفته شد. متغیرهای دیگری مانند افزایش نقطه جوش، بریکس رفاکتومتریک مایع (شیره) مادر، ویسکوزیته، درصد بلور، سطح و دمای ماسکویت، مصرف بخار یا جریان ورودی شربت (Knovl et Moller, ۱۹۷۵/۷۶) نیز به‌کار گرفته شدند.

کنترل‌کننده‌های پنوماتیک و الکتروپنوماتیک استفاده می‌شدند. به‌طور کلی، فازهای پیچیده‌ای مانند پر کردن، تغلیظ، دانه بندی، تشکیل بلور و رقیق‌سازی تحت خلأ کم به‌صورت دستی کنترل می‌شدند. نقش اپراتور پاتیل در این فرآیند بسیار مهم بود. جوشیدن نهایی و سفت شدن ماسکویت برنامه‌ریزی می‌شد. در دهه ۱۹۶۰، گسترش قابل توجهی در کنترل خودکار فرآیند کریستالیزاسیون به‌وجود آمد. افزایش خودکارسازی مراحل مختلف صنعت شکر همراه با دشواری در یافتن کارگران ماهر، منجر به ساخت اتاق‌های کنترل مرکزی شد که تعداد کمی از کارکنان قادر به کنترل تمامی بخش‌های فرآیند بودند. به‌طور کلی، دو اتاق کنترل وجود داشت: یکی برای رئیس کارخانه و دیگری برای بخش پشتیبانی. از زمان ظهور کامپیوترها و میکروپردازنده‌ها، کنترل مستقیم دیجیتال معرفی شد که به افزایش بهره‌وری منجر شد. کنترلر منطقی برنامه‌پذیر (PLC) انعطاف‌پذیری بیشتری را فراهم می‌کند، زیرا مهندس کنترل فرآیند می‌تواند راه‌حل‌هایی برای مشکلات موجود در کارخانه برنامه‌ریزی کند. سیستم‌های کنترل دیجیتال که در آن‌ها کامپیوترها از طریق یک باس به یکدیگر متصل هستند، به‌عنوان ابزارهای خودکار کنترل قابل اعتماد و مقاوم شناخته می‌شوند. کار در اتاق‌های کنترل اکنون به یکی از جنبه‌های مهم مدیریت کارخانه تبدیل شده است (van der Poel et al., ۱۹۹۸).

۳-۸- چشم‌اندازهای قرن بیست و یکم

نقطه شروع پیشرفت‌های فناورانه همواره با دانش بهتر در سطح مولکولی فرآیندها همراه است. این موضوع برای فناوری شکر نیز صادق است. پیشرفت‌های کنونی و چشم‌اندازهای تکامل فرآوری شکر از تکامل سریع تکنیک‌های جداسازی ناشی می‌شود که ابتدا برای اهداف تحلیلی به‌کار گرفته شدند و سپس در سطح پایلوت‌ها (آزمایشی) و کارخانه‌ها گسترش یافتند. به‌طور مشابه، مطالعات ساختاری و مولکولی شکر، غیرشکر و تعاملات آن‌ها به کشف برخی از واکنش‌های پیچیده‌ای که در طول فرآیند اتفاق می‌افتند، کمک می‌کند.

۳-۹- روندهای جدید در تکنیک‌های تحلیلی

• روش‌های کروماتوگرافی:

جداسازی خاص شکرها، آنیون‌ها و کاتیون‌ها با استفاده از ستون‌های تبادل یونی بسیار انتخابی موجب محبوبیت استفاده از کروماتوگرافی مایع در کارخانه‌ها و مراکز تحقیقاتی شکر در ۱۵ سال گذشته شده است. این امر به دلیل افزایش حساسیت تشخیص الکتروشیمیایی پالسی بدون نیاز به تغییر شکل است. با استفاده از HPAEC-PAD

می‌توان سطوح پایین (نانوگرم) شکرها را شناسایی کرد، پلی‌ساکاریدها را پس از تجزیه هیدرولیز شناسایی کرد و اجزای جزئی (آلی و معدنی) شکر سفید را با دقت خوب تجزیه و تحلیل کرد.

- طیف‌سنجی فروسرخ (مادون قرمز)

روش‌های طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (NIR) به‌عنوان ابزارهای سریع، غیرمخرب و آنلاین برای نظارت بر فرآیندهای شکر توسعه یافته‌اند. این روش به‌عنوان یک روش ثانویه باقی می‌ماند که به تکنیک کالیبراسیون بستگی دارد. این روش از پیشرفت‌های اخیر در روش‌های آماری (PLS، PCR) توسعه فیبر نوری و استفاده از تبدیل فوریه (Fourier) بهره برده است که این فناوری را بسیار مرتبط تر، در مقایسه با ابزارهای اولیه جعبه سیاه، در زمان معرفی NIR می‌کند.

- طیف‌سنجی فروسرخ میانه (MIR) نیز ثابت کرده است که یک تکنیک قدرتمند است، هم برای تحلیل‌های آزمایشگاهی و هم برای کنترل فرآیند. دستگاه‌های جدید، فشرده، مقاوم و مهر و موم‌شده ممکن است در کارخانه‌های شکر آینده‌ای درخشان داشته باشند به دلیل اطلاعات غنی که طیف FTIR فراهم می‌کند و لوازم جانبی متعددی که قابل استفاده است (مانند ATR).

۳-۱۰-اندازه‌گیری رنگ آنلاین

یک سیستم جدید برای اندازه‌گیری رنگ آنلاین به تازگی توسعه یافته است. این سیستم امکان اندازه‌گیری‌های سریع (کمتر از ۵ ثانیه) را بدون نیاز به آماده‌سازی نمونه فراهم می‌آورد. بازخورد سریع این امکان را فراهم می‌کند که زمان شستشو در سانتریفیوژها بهینه‌سازی شده و از ورود شکر نامرغوب به خشک‌کن جلوگیری شود. یکنواختی و بهبود کیفیت با استفاده از دستگاه Colour Q-۸۰۰ Neltec به دست می‌آید. این روش برای شکر سفید به‌طور موفقیت‌آمیز آزمایش شده است تا با مشخصات مشتریان مطابقت داشته باشد. همچنین به نظر می‌رسد که این روش برای شکر خام وارد شده به پالایشگاه قابل استفاده باشد تا تحلیلی پیوسته و نظارتی از فرآیند تایید کیفیت انجام دهد.

۳-۱۰-۱-تکنولوژی غشایی

فرآیندهای فیلتراسیون غشایی (میکرو، اولترا و نانو فیلتراسیون) در زمینه فناوری شکر در مراحل مختلف ساخت بررسی شده‌اند، اما بیشتر در سطح پیلوت. قابلیت استفاده از نسل‌های اولیه غشاهای پلیمری در مورد مقاومت غشا در برابر دما، pH و آسیب ناشی از معلقات جامد قابل تردید بود. توسعه اخیر غشاهای معدنی امکان استفاده بیشتر از اولترافیلتراسیون صنعتی برای تصفیه شیر (شربت) نیشکر را فراهم کرده است (Cartier et al., ۱۹۹۶). فرآیند نانو فیلتراسیون همچنین در جداسازی نمک‌ها و رنگ‌دانه‌ها از جریان الوتی (شستشو) رزین‌های رنگبری مؤثر بوده است. ترکیب نانو فیلتراسیون با رزین‌های رنگبری در پالایشگاه‌های شکر نیشکر در سطح صنعتی با موفقیت به کار گرفته شده است (Theoleyre et al., ۱۹۹۹).

۳-۱۰-۲-میکرو فیلتراسیون جریان متقاطع

میکرو فیلتراسیون جریان متقاطع از نظر تأثیر شرایط نظارتی بر عملکردها در هنگام استفاده برای ذوب مجدد شکر خام نیشکر بررسی شده است. شرایط بهینه تعیین شده و نقش چگالی شار بهینه تأکید شده است (Trichard et al., ۱۹۹۸). آگاهی بهتر از ماهیت، ساختار و خواص باقیمانده‌ها می‌تواند بهره‌برداری از غشاها را بهبود بخشد و مطالعات پیلوت (آزمایشی) متعدد را به کاربردهای صنعتی سوق دهد.

۳-۱۱- جداسازی کروماتوگرافی

جداسازی کروماتوگرافی ملاس از دهه ۱۹۷۰ برای حذف شکر (شکرزدایی) از ملاس چغندر به کار گرفته شده است. سطوح بالای نمک‌های کلسیم و منیزیم در ملاس نیشکر، استفاده از جداسازی کروماتوگرافی را دشوار می‌کند. امکان استفاده از کروماتوگرافی برای شربت سبز کمرنگ و شربت غلیظ به‌تازگی مورد بحث قرار گرفته است (Paananen, ۲۰۰۰). بهبود فناوری و جنبه‌های اقتصادی جایگزینی فناوری کلاسیک شامل: جوشاندن، ذوب مجدد و جوشاندن دوباره با فرآیندی که شامل جداسازی کروماتوگرافی است به نظر غیر مرتبط نمی‌آید.

۳-۱۲- کروماتوگرافی بستر متحرک شبیه‌سازی شده (SMB)

کروماتوگرافی بستر متحرک شبیه‌سازی شده (SMB) برای حذف شکر (شکرزدایی) از ملاس چغندر و نیشکر به کار گرفته شده است. فرآیند SMB به‌عنوان یک سیستم پیوسته توسعه داده شد که در آن جریان‌های متقابل رزین از یک طرف و ملاس از طرف دیگر به‌طور منظم در فواصل زمانی تغییر می‌کنند تا نرخ‌های متعادل در ورودی و خروجی ایجاد شود. فرآیند بستر متحرک شبیه‌سازی شده بهبود یافته (ISMB) مزایای بیشتری مانند کاهش حجم رزین‌ها، بهینه‌سازی مقادیر آب مورد نیاز برای شستشوی و حداقل کردن رقیق سازی محصول تصفیه‌شده را به همراه دارد که باعث صرفه‌جویی در انرژی در فرآیند تبخیر می‌شود.

۳-۱۳- ترکیب فناوری‌های نوآورانه و چشم‌انداز برای قرن ۲۱

هیچ فناوری واحدی نمی‌تواند همزمان مشکلات اقتصادی و محدودیت‌های فرآیندی را حل کند. آینده فناوری شکر بر پایه تطبیق تقریبی بلادرنگ فرآیند شکر برای حل مشکلات فنی، رعایت مقررات (ایمنی، محیط زیست، تضمین کیفیت) و در عین حال افزایش سودآوری وابسته است. کارخانه شکر در آینده به‌طور مشترک از یک طرح یکسان برای تمام انواع محصولات کشاورزی، شرایط آب و هوایی و وضعیت اجتماعی-اقتصادی کارگران استفاده نخواهد کرد.

سه نوع رویکرد باید وجود داشته باشد:

- **نوع ۱:** کارخانه شکر چغندر در شمال اروپا و آمریکای شمالی، جایی که محدودیت‌های زیست محیطی، همراه با نیروی کار با صلاحیت بالا و امکان سرمایه‌گذاری‌های بالاتر می‌توان فرآیندهای شکر پیشرفته‌ای و با فناوری بالا را پیاده سازی کرد را فراهم کند.
- **نوع ۲:** کارخانه شکر نیشکری در مناطق مهم تولید نیشکر (مانند: استرالیا، آفریقای جنوبی، آمریکای شمالی و جنوبی) که از همان فناوری‌های چغندر استفاده می‌کند، باید به بهینه‌سازی فرآیند وارونگی ساکارز بیندیشند و به سمت تولید شربت‌های شکر چند مؤلفه‌ای (جزئی) حرکت کنند، مانند HFCS (که در اینجا "C" می‌تواند نمایانگر نیشکر باشد) فکر کند. این ایده به‌هیچ‌وجه بی‌معنی نیست زیرا مشاهده می‌کنیم که مصرف‌کننده چگونه در برابر استفاده از شربت‌های ذرت از محصولات تراریخته مقاومت نشان می‌دهد.
- **نوع ۳:** سرانجام، برای کشورهای در حال توسعه، کارگاه‌های کوچک باید متناسب با اقتصاد محلی و شرایط اجتماعی-اقتصادی کارگران طراحی شوند. کارخانه‌های کوچک مقیاس که از مفاهیم و استانداردهای مدرن استفاده می‌کنند، باید از نظر اقتصادی قابل قبول و پایدار باشند باشند.

۳-۱۳-۱ ترکیب جداسازی غشایی، تبادل یونی و کریستالیزاسیون سرد (chiller) در کارخانه‌های شکر چغندر (نوع ۱)

تحقیقات گسترده اخیر درباره امکان کریستالیزه کردن شربت خام به‌طور مستقیم با استفاده از کریستالیزاسیون سرد (chiller) (Vaccari and Mantovani, ۱۹۸۷) مزایای این روش را نسبت به کریستالیزاسیون تبخیر کلاسیک نشان داد. ترکیب کریستالیزاسیون سرد با میکروفیلتراسیون (Mantovani and Vaccari, ۱۹۹۸) به‌عنوان روشی کارآمد برای تولید شکر سفید به‌طور مستقیم از اولین کریستال گیری تبدیل شربت و همچنین استخراج مؤثر قند در ملاس شناسایی شد. این آزمایشات در سطح آزمایشگاهی و پیلوت همچنین برای شربت خام نیشکر که در آن تصفیه کلاسیک کربنات-کلسیم با میکروفیلتراسیون و کروماتوگرافی بستر متحرک شبیه‌سازی شده (SMB) جایگزین شد، نیز انجام شد (Mantovani and Vaccari, ۱۹۹۹) تصفیه شکر خام نیز می‌تواند از کریستالیزاسیون سرد بعد از رنگبری (decolourizing) شربت شفاف و فیلتراسیون به جای روشهای کلاسیک فسفاتاسیون یا کربناسیون استفاده کند. علاوه بر این، کار در دمای پایین باعث می‌شود که غلظت فروکتو-لیگوساکاریدها (مانند: کستوزها) در ملاس کریستالیزاسیون سرد افزایش یابد. استفاده از ISMB می‌تواند به بازیابی بتائین از یک طرف و فروکتو-لیگوساکاریدها و ساکارز از طرف دیگر کمک کند. ارزش افزوده بتائین در خوراکی و کاربردهای آرایشی و استفاده از کستوزها به‌عنوان مواد مغذی پروبیوتیک می‌تواند به بهبود سودآوری فرآیند جدید کمک کند.

مزایای اصلی در این فرآیند جدید عبارتند از:

- حذف تصفیه کربنات-کلسیم
- کاهش مصرف سوخت، سنگ آهک و آب
- حفاظت از محیط زیست از طریق حداقل کردن تولید پسماندها

اضافه کردن فناوری‌های نوآورانه مانند فرآیند تبخیر برای بازیابی مواد جامد حل‌شده در جریان‌های فرآیندی بسیار رقیق (Ramm-Schmidt, ۱۹۹۶) به طرح میکروفیلتراسیون-کریستالیزاسیون سرد می‌تواند به حذف انواع پسماندها و بازیافت آب کمک کند. همچنین، کاربرد فناوری تبخیر جدید به‌طور موفقیت‌آمیز در فرآیند حذف شکر (شکر زدایی) کروماتوگرافی با استفاده از کروماتوگرافی بستر متحرک شبیه‌سازی شده (SMB) نیز اعمال شده است که در نتیجه آن صرفه‌جویی در انرژی، افزایش ظرفیت کارخانه، افزایش خلوص بخش‌ها (فراکسیون‌ها) و امکان‌پذیری اقتصادی بازیابی بخش‌های (فراکسیون‌های) جدید رقیق را فراهم کرده است (Ramm-Schmidt, ۱۹۹۶).

۳-۱۳-۲ فرآیندهای جداسازی و فناوری‌های آنزیمی به‌کاررفته در شربت خام نیشکر (نوع ۲)

مانند شربت چغندر، شربت خام نیشکر نیز می‌تواند بدون استفاده از روش کلسیم-کربنیک تصفیه شود. فرآیندهای جداسازی مختلف به‌عنوان جایگزین آهک‌زنی پیشنهاد شده‌اند. به‌عنوان مثال، فرآیند "A.B.C." که شامل غربالگری پیوسته، اولترافیلتراسیون (فوق شفاف‌سازی) و جذب رنگدانه‌ها می‌باشد (Monclin and Willett, ۱۹۹۶) شرکت Amalgamated Sugar یک فرآیند جداسازی کروماتوگرافی برای شربت خام چغندر یا نیشکر پیشنهاد کرده است که به‌طور مؤثر جایگزین آهک زنی و کربناسیون (carbonation) می‌شود (Kearny, ۱۹۹۶) این فرآیند امکان تولید مستقیم شکر سفید در کارخانه را فراهم می‌آورد. این فرآیند می‌تواند از روش‌های کلاسیک کریستالیزاسیون تبخیر یا روش نوآورانه کریستالیزاسیون سرد استفاده کند. فناوری غشایی نیز در کارخانه‌های شکر نیشکر بسیار کارآمد هستند.

اولترافیلتریشن (Ultrafiltration) به حذف ۹۰٪ کدورت و ۲۰٪ رنگدانه‌ها با استفاده از غشاهای معدنی Techsep برای تصفیه شربت خام نیشکر رسید (Cartier et al., ۱۹۹۶).

فناوری غشا و همچنین جداسازی کروماتوگرافی SMB در تولید شربت‌های گلوکز نیز به‌خوبی شناخته شده است. شربت خام تصفیه‌شده از نیشکر می‌تواند با استفاده از اینورتاز ثابت‌شده معکوس شود و به فروکتوز و گلوکز تفکیک گردد. آنزیم‌هایی مانند dextranses و آمیلازها (amylases) می‌توانند در مرحله استخراج برای کمک به بازیابی گلوکز پلیمری‌شده معرفی شوند. تولید مستقیم شربت‌های قندی با غلظت‌های مختلف D-گلوکز، D-فروکتوز و ساکارز برای تأمین نیاز صنایع غذایی می‌تواند پاسخی به امتناع مشتریان از استفاده از شربت‌های ذرت ترانس‌ژنتیک (تراریخته) باشد. تنوع در تولید انواع کریستال‌های شکرهای کشت‌شده در کریستالیزاسیون‌های سرد (مانند D- α -گلوکز مونو هیدرات و ساکارز) و فرمول‌های مختلف شربت‌های گلوکز-فروکتوز-ساکارز ممکن است راه‌حلی انعطاف‌پذیر برای بازاری که به‌طور پیوسته در حال تغییر است، ارائه شود.

۳-۱۳-۳- کارخانه‌های کوچک مقیاس (نوع ۳):

روند فعلی افزایش ظرفیت کارخانه‌های شکر به حداکثر خود نزدیک شده است. چنین روندی می‌تواند برای اقتصادی در حال توسعه مناسب باشد که در آن هزینه نیروی کار کاهش یافته و در عین حال تجهیزات پیشرفته‌تری به کار گرفته شود. برای کشورهای در حال توسعه، شکر همچنان منبع مهم انرژی در رژیم غذایی انسان است. وضعیت اشتغال به‌گونه‌ای است که مکانیزاسیون برای تمام بخش‌های فعالیت در تولید شکر توصیه نمی‌شود. توسعه فرآیند باید از روش‌های دسته‌ای با کنترل خودکار متناسب استفاده کند. واحدهای عملیاتی که برای جریان فرآیند کارخانه شکر در کشورهای در حال توسعه انتخاب می‌شوند نباید تنها انتقال ساده آنچه که تأمین‌کنندگان تجهیزات برای صنایع اروپایی یا آمریکایی شمالی توصیه می‌کنند، باشد. مشکلات حیاتی مانند کمبود آب شرب، نیاز به تقسیم کار و در نهایت اشتغال کامل باید در اولویت قرار گیرند، نه افزایش بهره‌وری و سودآوری. استفاده از فناوری استخراج کارآمد مانند آسیاب سه‌غلطک معکوس که در آن تخلیه در همان جهت جریان باگاس صورت می‌گیرد (Sullivan, ۱۹۹۵) می‌تواند با flocculation و cross-filtration برای حذف ناخالصی‌ها از شربت خام نیشکر همراه شود. این واحدهای استخراج و تصفیه باید اندازه مناسب داشته باشند تا از حمل و نقل پرهزینه نیشکر جلوگیری شود. شربت خام تصفیه‌شده می‌تواند با استفاده از تبخیر دسته‌ای یا پدهای کریستالیزاسیون سرد برای بازار داخلی کریستالیزه شود. کشورهای در حال توسعه همچنین می‌توانند با رعایت مقررات شکر ارگانیک، در این نوع تولید تخصص پیدا کنند و آن را برای صادرات به بازار جهانی ارائه دهند. برای کاهش شکاف عظیم بین اقتصاد کشورهای شمال و جنوب، حداقل یک حداقل همبستگی بین‌المللی نیاز است.

۴- بحث و نتیجه گیری

بحث: تحلیل تاریخی صنعت شکر نشان می دهد که این حوزه از اواخر قرن نوزدهم تاکنون تغییرات چشمگیری را تجربه کرده است. پیشرفت های فناوری مانند استفاده از میکروفلتراسیون، اولترافیلتراسیون، و کروماتوگرافی بستر متحرک شبیه سازی شده (SMB) در کنار کریستالیزاسیون سرد، امکان افزایش بازدهی، کاهش مصرف انرژی و تولید محصولات باکیفیت تر را فراهم کرده است. در کشورهای توسعه یافته، تمرکز بر بهره وری انرژی، کاهش اثرات زیست محیطی و استفاده از فناوری های خودکار به ارتقای کیفیت و کاهش هزینه های تولید کمک کرده است. در مقابل، کشورهای در حال توسعه همچنان با مشکلاتی نظیر وابستگی به روش های سنتی، کمبود منابع آبی و نیاز به اشتغال زایی روبه رو هستند. این کشورها می توانند از رویکردهای مقیاس کوچک و فناوری های متناسب با شرایط اجتماعی و اقتصادی بهره ببرند. فناوری هایی مانند SMB و میکروفلتراسیون در کنار تصفیه آهکی به کاهش مصرف سوخت و آب، راهکارهای نوآورانه ای برای حفظ منابع طبیعی و کاهش ضایعات ارائه می دهند. در همین راستا، تولید شربت های چندجزئی نیز به عنوان راهکاری برای افزایش تولید شکر و گسترش بازار صادرات و افزایش درآمد پیشنهاد می شود.

نتیجه گیری: نتایج این تحقیق نشان می دهد که پیشرفت های فناوری، به ویژه در حوزه تصفیه و کریستالیزاسیون شکر، نقش کلیدی در افزایش بهره وری و کاهش اثرات زیست محیطی این صنعت داشته است. با وجود این، موفقیت در این حوزه مستلزم اتخاذ رویکردهای متناسب با نیازهای منطقه ای است. در کشورهای توسعه یافته، تمرکز بر فناوری های پیشرفته، اتوماسیون و کاهش ضایعات، امکان دستیابی به تولید پایدار و اقتصادی را فراهم می کند. از سوی دیگر، کشورهای در حال توسعه با بهره گیری از فناوری های ساده تر و تطبیق یافته با شرایط محلی، می توانند علاوه بر بهبود کیفیت محصولات، فرصت های شغلی بیشتری ایجاد کرده و نقش موثری در توسعه پایدار اقتصادی ایفا کنند. در نهایت، توسعه صنعت شکر در قرن بیست و یکم نیازمند همکاری های بین المللی در انتقال دانش و فناوری، حمایت از تولیدکنندگان محلی، و تأمین منابع مالی برای اجرای طرح های نوآورانه است. این رویکردها می توانند به کاهش شکاف اقتصادی بین کشورها کمک کرده و به پایداری زیست محیطی و اقتصادی این صنعت در سطح جهانی منجر شوند.

منابع :

- [۱] Bonnenfant, P. (۱۹۹۹) Proceedings ۳th AVH Symposium, Reims.
- [۲] Cartier, S., Theoleyre, M.A., Lancrenon, X. and Decloux, M. (۱۹۹۶) Proceedings of the Workshop on separation Processing Sugar Industry, SPRI, New Orleans.
- [۳] Galloway, J.H. (۱۹۸۹) The Sugar Cane Industry, Cambridge University Press
- [۴] Honig, P. (۱۹۵۳) Principles of Sugar Technology, Elsevier, Amsterdam.
- [۵] Hugot E. (۱۹۸۶) Handbook of Cane Sugar Engineering, Elsevier, Amsterdam.
- [۶] Kearney, M.M. (۱۹۹۶) Proceedings of the Workshop on separation Processing Sugar Industry, SPRI, New Orleans.
- [۷] Knovl, E.A. and Moller, G.R. (۱۹۷۵/۷۶) Sugar Technol. Rev., ۳, ۲۷۵-۳۰۹.
- [۸] Krause, E.W. and Kordel, P. (۱۹۹۷) New Processes in the Sugar Industry, F.O. Licht Yearbook
- [۹] Mantovani, G. and Vaccari G. (۱۹۹۸) Patent N° GE ۹۸ A۰۰۰۰۳۹
- [۱۰] Mantovani, G. and Vaccari, G. (۱۹۹۹) Proceedings ۳th AVH Symposium, Reims.
- [۱۱] Monclin, J.P. and Willett, S.C. (۱۹۹۶) Proceedings of the Workshop on Separation Processes in the Sugar industry, New Orleans.
- [۱۲] Paananen, H. (۲۰۰۰) Proceedings ۷th AVH Symposium, Reims.
- [۱۳] Poel van der, P.W. (۱۹۸۲) E.P. O ۱۰۴۲۷۷, CSM Suiker, B.V.
- [۱۴] Poel van der, P.W. et al. (۱۹۸۵) Sucr. Belge, ۱۰۳, ۱۵-۲۱.
- [۱۵] Poel van der, P.W., Schiweck, H. and Schwartz, T. (۱۹۹۸) Sugar Technology, Beet and Cane Manufacture, Verlag Dr Albert Bartens, Berlin.
- [۱۶] Ramm-Schmidt, L.H. (۱۹۹۶) Proceedings of the Workshop on Separation Processes in the Sugar industry, New Orleans.
- [۱۷] Silin, P.M. (۱۹۳۷) ۵ème Congrès International de Technologie des industries Agricoles, Scheveningen
- [۱۸] Sullivan, M.D. (۱۹۹۵) Int. Sugar J., ۹۷, ۳۰۳ – ۳۰۶.
- [۱۹] Theoleyre, M.A. and Cartier, S. (۱۹۹۹) Proceedings of the ۳th AVH Symposium, Reims.
- [۲۰] Trichard, J.M., Tatoud, L. and Decloux, M. (۱۹۹۸), Ind. Alim. Agric., ۱۱۵, ۲۱-۲۹.
- [۲۱] Vaccari G. and Mantovani, G. (۱۹۸۷) Patent N°۱۲۰۸۳۱۰
- [۲۲] Wieninger, L. and Kubadinov, N. (۱۹۷۱) Zucker, ۲۴(۱۹) ۵۹۹-۶۰۴.

The Sugar Industry In the ۲۰th Century in Europe: Technological Advancements and Forward-looking Strategies

Amir Mahdi Mahrokh

Bachelor's Degree in Food Science and Engineering, Department of Food Industries, Faculty of Food Industries, Khuzestan Agricultural and Natural Resources University

Abstract:

Objective: This study examines the evolution of sugar production processes from the ۱۹th to the ۲۰th century and the impact of innovative technologies on increasing efficiency, reducing costs, and protecting the environment. Its primary aim is to analyze the historical developments in the extraction and purification of sugar from beets and cane, introduce advanced technologies such as simulated moving bed chromatography (SMB) and membrane processes, and provide solutions to the challenges faced by developing countries.

Methodology: The study employs a historical-comparative analysis, supported by empirical data, scientific formulas, and an evaluation of industrial innovations related to sugar extraction and purification. It also explores the economic, environmental, and social aspects of technologies used in sugar industries in developed and developing countries. **Findings:** The analysis reveals that advancements in sugar extraction and purification technologies, such as microfiltration, cooling crystallization, and SMB chromatography, have resulted in increased efficiency, reduced energy consumption, decreased waste, and the production of higher-quality products. In developing countries, adopting context-appropriate technologies, such as small-scale facilities and sugar production, could help bridge the economic gap between developed countries and developing countries. **Conclusion:** The evolution of sugar production technologies highlights the positive impact of research and development on the efficiency and environmental sustainability of the industry. While developed countries benefit from advanced technologies to improve quality and lower costs, adapting these technologies to the specific needs of developing countries can promote job creation, reduce poverty, and enhance exports. Enhancing international collaboration for knowledge transfer and supporting developing countries are key factors in achieving sustainable development in the sugar industry.

Key words: SMB, Sugar, Microfiltration, Chromatography, Extraction technology