



Zapotrzebowanie na energię w przemyśle browarniczym

Aleksandra Modzelewska¹, Mateusz Jackowski²

¹Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny

²Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny,
Katedra Inżynierii Bioprocessowej, Mikro i Nanoinżynierii

e-mail: 240346@student.pwr.edu.pl

Streszczenie

Piwo towarzyszy człowiekowi już od czasów starożytnych, początkowo produkowane na niewielką skalę, by w czasach następujących po rewolucji przemysłowej mogło być wytwarzane masowo i stać się jednym z najpopularniejszych napojów na świecie.

Do produkcji piwa wykorzystuje się cztery główne surowce: sód, chmiel, wodę i drożdże. Wytwarzanie piwa jest procesem wieloetapowym, a jego kluczowe elementy to zacieranie (połączenie ześrutowanego siodu z gorącą wodą), warzenie (gotowanie z użyciem chmielu), fermentacja z użyciem drożdży, leżakowanie i rozlew. Na każdym z tych etapów wykorzystywane są znaczące zasoby energii, przede wszystkim ze względu na duże uzależnienie wydajności procesu od odpowiedniej temperatury. Piwo, przechodząc przez kolejne etapy jego powstawania, musi zostać najpierw podgrzane do wysokich temperatur (m.in. do temperatury wrzenia na kilka godzin), a następnie schłodzone do zakresu 8–30°C, aby mogły w nim funkcjonować drożdże podczas fermentacji. Energia jest zatem wykorzystywana głównie w postaci dostarczanego do obiektów browaru ciepła i chłodu (niemal połowa całkowitego zużycia), ale również do zmechanizowanego procesu rozlewania, butelkowania i pakowania (ok. jedna trzecia energii).

Aktualnie w browarnictwie coraz popularniejsze staje się wykorzystywanie odnawialnych źródeł energii. Po znaczącym wzroście zużycia energii w czasach udoskonaleń technologicznych, wprowadzonych w browarach po rewolucji przemysłowej

wej, zapotrzebowanie na energię zaczęło powoli maleć w ramach wprowadzenia energooszczędnych komponentów i cyrkularnego gospodarowania ciepłem. W połączeniu z dodatkową możliwością ponownego wykorzystania niektórych odpadów browarniczych, proces wytwarzania piwa staje się coraz bardziej przyjazny środowisku.

Słowa kluczowe: browarnictwo, zapotrzebowanie na energię, przemysł piwowarski, produkcja piwa

1. Historia piwa i jego produkcji

Piwo jest napojem alkoholowym znanym ludzkości od czasów starożytnych. Najstarsze znaleziska archeologiczne, mogące świadczyć o produkcji piwa, pochodzą z epoki kamienia [1]. Natomiast niepodważalne dowody na produkcję piwa pochodzą z epoki brązu [2], [3]. Pierwszymi wielkimi cywilizacjami produkującymi piwo byli Sumerowie, Egipcjanie i Babilończycy, z czego ci ostatni jako pierwsi zastosowali chmiel w procesie produkcji.

W czasach rozkwitu kultury starożytnej Grecji i Rzymu piwo nie cieszyło się dużym zainteresowaniem, lecz nie zostało zapomniane. Swoją największą popularność w tamtych czasach omawiany trunek miał głównie na północ od basenu Morza Śródziemnego, na terenach obecnej Francji i Niemiec. Dopiero w średniowieczu za sprawą klasztorów, a później również miejskich browarów, piwo wróciło do łask. Od XVIII w. browarnictwo zaczęło się szybko rozwijać, głównie za sprawą naukowców, którzy zaczęli bliżej przyglądać się tej znanej od wieków, choć słabo zbadanej, gałęzi przemysłu spożywczego [4].

W wieku XIX, w dobie rewolucji przemysłowej, w browarach zaczęły się pojawiać nowinki techniczne, które przemieniły je w nowoczesne fabryki. W ten sposób maszyny parowe zaczęły napędzać urządzenia mechaniczne oraz dostarczać gorącą parę do ogrzewania kadzi. Wprowadzenie agregatów chłodniczych uniezależniło omawiane zakłady od dostaw lodu i pozwoliło na ciągłą produkcję piwa, bez względu na porę roku [5].

Na początku XX w. piwo zaczęło być coraz częściej pakowane do butelek i puszek zamiast tradycyjnych beczek, co poskutkowało pojawieniem się kolejnych rozwiązań technicznych w browarach [6]. Od połowy XX w. browary stały się wysoce wyspecjalizowanymi zakładami produkcyjnymi, w których poza podstawowymi surowcami piwowarskimi główną rolę odgrywa energia elektryczna oraz cieplna, której ciągłe dostawy są niezbędne, aby sprostać popytowi generowanemu przez obecnych konsumentów [7].

2. Surowce wykorzystywane w produkcji piwa

Od początków produkcji piwa dużą wagę przykładano do używanych surowców. Znane są liczne przepisy na piwo, w których opisano wykorzystywane składniki, niemniej dopiero w XVI w. powstało tzw. Bawarskie Prawo Czystości, które wypunktowywało jedyne surowce dopuszczone do produkcji piwa. Są to woda, słód, drożdże i chmiel [8].

Słód

Pozyskiwany głównie w procesie obróbki ziaren jęczmienia. Kluczową cechą tego surowca jest zawarta w nim skrobia, niezbędna do uzyskania odpowiedniego smaku i aromatu piwa z określoną zawartością alkoholu [9].

Chmiel

Występuje w różnych odmianach, które charakteryzują się specyficznymi walorami smakowymi i zapachowymi. Wykorzystuje się go jako przyprawę do piwa, odpowiednio dobierając ilość i czas gotowania, potrzebne do otrzymania oczekiwanej goryczki. Szyszki chmielowe najczęściej są przetwarzane do postaci granulatu, co ułatwia ich transport i przechowywanie oraz utrwalą ich właściwości [10].

Woda

Wykorzystywana jest nie tylko jako składnik piwa, ale również w znacznie większej ilości do takich operacji, jak mycie aparatury czy ługowanie. Estymuje się, że na jeden hektolitr produktu wykorzystuje się nawet sześć hektolitrów wody. Wykorzystywana w browarnictwie woda musi być jak najlepszej jakości i o dużej czystości, spełniając wszystkie wymagania stawiane wodzie do picia. Ma to duży wpływ na smak wytworzonego z jej użyciem piwa [11].

Drożdże

Odpowiadają za obecny w piwie alkohol. Cukry zawarte w uprzednio przygotowanym słodzie są przetwarzane przez nie w reakcji fermentacji alkoholowej. Produktami tego procesu są przede wszystkim dwutlenek węgla i alkohol etylowy. Podstawowe kryterium podziału drożdży to sposób, w jaki przebiega przeprowadzana przez nie fermentacja. Drożdże dzieli się na dwie główne grupy:

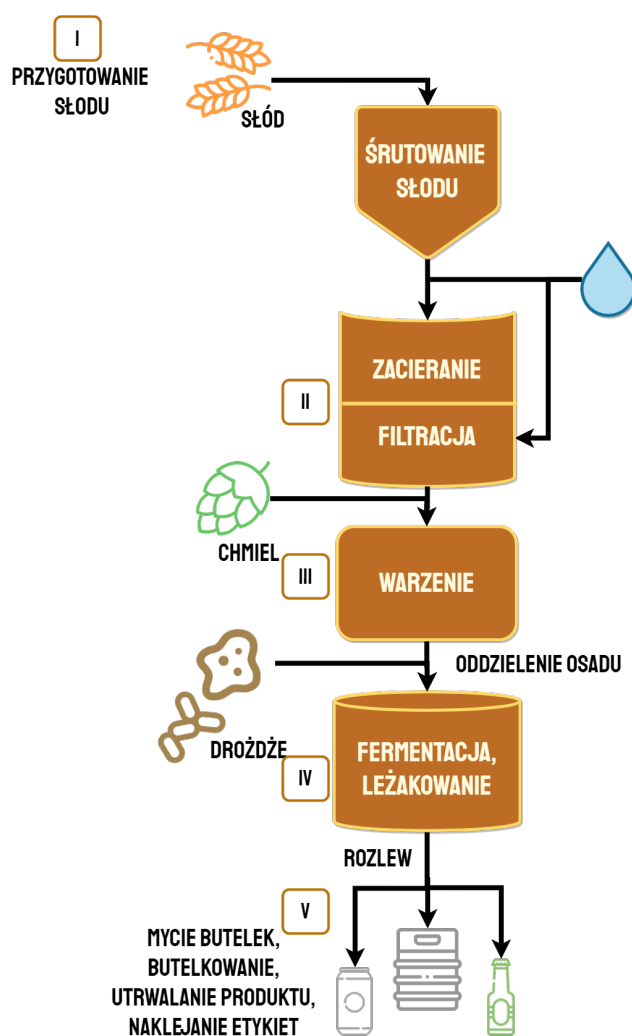
- Drożdże górnej fermentacji – gromadzą się na powierzchni brzezki po przeprowadzonej fermentacji. Do tej grupy zalicza się przede wszystkim te, które wykorzystuje się w produkcji piwa typu Ale. Ich

charakterystyczną cechą jest także wyższa optymalna temperatura fermentacji – wynosząca około 20°C, sięgająca nawet 25°C i więcej.

- Drożdże dolnej fermentacji – gromadzą się na dnie zbiornika. Wykorzystuje się je głównie do produkowania piwa typu Lager, a optimum temperatury zawiera się w nieco niższym zakresie – od ok. 7 do 15°C [7], [8].

3. Proces produkcji piwa

Proces produkcji piwa to proces technologiczny doskonalony przez stulecia. Obecnie jest to odrębna i wysoce wyspecjalizowana gałąź przemysłu spożywczego. Proces produkcji piwa zaczyna się na polach, gdzie hoduje się jęczmień, pszenicę i chmiel. Proces produkcji słodu to odrębny proces, wart osobnego opracowania. W przedstawionym rozdziale zaprezentowano przebieg procesu produkcji piwa, od dostarczenia surowców do browaru, aż do rozlewu i ekspedycji gotowego produktu do konsumentów.



Rys. 1. Proces wytwarzania piwa

I. Produkcja słodu

Produkcja piwa (rys. 1) zaczyna się już w momencie odpowiedniego przygotowania surowca. Na samym początku ziarna jęczmienia muszą zostać poddane wstępnym modyfikacjom, aby mogły być wykorzystane w piwowarstwie. Po okresie dojrzewania późniejszego ziarna te są moczone, w celu zainicjowania kiełkowania. Podczas tego procesu uwalnianie i tworzone są enzymy – amylazy, których zdolność do rozkładania zawartej w jęczmieniu skrobi jest bardzo istotna i wykorzystywana w późniejszych etapach. Kiełkowanie ziarna jest zatrzymywane poprzez wysuszenie go w wysokiej temperaturze. Sprawia to, że zarodek przestaje się rozwijać, a ziarno pozbawiane jest zgromadzonej w nim wody. Pozwala to na utrwalenie jego składu chemicznego.

II. Wytwarzanie brzezki

Przygotowany według powyższej metody sład musi zostać poddany śrutowaniu. Następnie odpowiednią ilość ześrutowanego słodu miesza się z podgrzaną do odpowiedniej temperatury wodą. Odpowiednia regulacja temperatury w zakresie od 60 do 75°C intensyfikuje działanie zawartych w sładzie enzymów – α i β -amylazy, które rozkładają skrobię do cukrów, które mogą zostać zmetabolizowane przez drożdże w dalszych etapach produkcji. W efekcie uzyskujemy wodny roztwór cukrów (brzezkę) oraz osad składający się z wysłodzin.

W kolejnym etapie brzezka musi zostać przefiltrowana. Do tego celu wykorzystuje się dobre właściwości filtracyjne wysłodzin. Spływająca po wysłodzinach brzezka jest przy okazji dodatkowo wzbogacana w pozostały w osadzie ekstrakt. Wysłodziny są przepłukiwane dodatkowo gorącą wodą w procesie ługowania, dzięki czemu jak największa ilość cukrów ze słodu przechodzi do brzezki.

III. Gotowanie brzezki

Uzyskany roztwór węglowodanów jest następnie gotowany w kotle warzelnym. Czas trwania tego procesu sięga nawet kilku godzin. W wysokiej temperaturze zniszczeniu ulegają zawarte w brzezce enzymy oraz odbywa się jej sterylizacja. Do gotującej się brzezki dodaje się określoną ilość chmielu, regulując czas chmielenia ze względu na wymagane właściwości piwa. Pierwsze 60 min chmielenia decyduje o goryczce piwa. Chmiel gotowany 20–30 minut wpływa jedynie na smak, a 15 min i mniej – na aromat.

IV. Fermentacja i leżakowanie

W kolejnym etapie brzezka jest ponownie filtrowana, chłodzona i umieszczana w fermentorach. Do tak przygotowanego roztworu dodaje się drożd-

dże, których zadaniem jest przeprowadzenie procesu fermentacji. Należy zaznaczyć się z charakterystyką wykorzystywanego szczepu drożdży, gdyż odpowiednie odmiany tych organizmów charakteryzują się indywidualnym optimum temperaturowym.

Drożdże wykorzystują cukry, które pojawiły się w roztworze w momencie zacierania, do pełnienia funkcji życiowych i uzyskiwania energii. Intensywność fermentacji można monitorować poprzez badanie ekstraktu, którego wartość stopniowo zmniejsza się wraz z ubywaniem pożywienia dla drożdży. Gdy ekstrakt przestanie się zmniejszać można uznać, że fermentacja zakończyła się i drożdże nie są w stanie przefermentować większej ilości cukrów.

Po ukończonej fermentacji piwo umieszczane jest w tankach leżakowych. W obniżonej temperaturze i bez dostępu do światła zachodzi dojrzewanie piwa – zmienia się jego barwa, staje się bardziej klarowne, poprawia się smak i zapach. Drożdże górnej i dolnej fermentacji zbierają się odpowiednio na powierzchni piwa lub dnie tanku, co ułatwia ich późniejsze oddzielenie.

V. Utrwalenie produktu, rozlew

Gotowe piwo rozlewa się do butelek, puszek lub kegów. Końcowy produkt jest dodatkowo utrwalany, na przykład w procesie pasteryzacji. Zaopatrzone w etykiety i spakowane produkty są gotowe do dystrybucji [7].

4. Zapotrzebowanie energetyczne

Browary charakteryzują się dużym zapotrzebowaniem energetycznym. Ciągły i nieprzerwany dopływ energii decyduje o właściwym przebiegu procesu technologicznego. Wykorzystywanie energii w browarze można pogrupować na trzy główne działy techniczne:

- 1) urządzenia do ogrzewania,
- 2) urządzenia chłodnicze,
- 3) instalacje elektrotechniczne.

Dodatkowo wyróżnia się także dział operujący sprężonym powietrzem i zaopatrujący w wodę.

Ogólne zapotrzebowanie energetyczne w produkcji piwa odnosi się przede wszystkim do regulacji temperatury. Ta część stanowi niemal połowę całkowitego zużycia energii. Kolejnymi głównymi elementami o dużym zapotrzebowaniu energetycznym są komponenty odpowiedzialne za rozlew, butelkowanie i pakowanie (ok. 30%). Mniej wymagające pod kątem energetycznym, ale równie ważne, są m.in. śrutowanie słodu, przygotowywanie zacieru, filtracja oraz chmielenie (17%). Należy również uwzględnić energię

konieczną do odpowiedniego magazynowania surowców i produktów, jak i do innych celów, nie wiążących się z produkcją piwa (8%) (rys. 2).



Rys. 2. Podział ogólnej spożytkowanej energii na poszczególne etapy procesu i obiekty browaru

4.1. Urządzenia do ogrzewania

Ze względu na wykorzystywanie w nim mikroorganizmów i opieranie się o zjawiska biologiczne produkcja piwa jest specyficznym procesem. Istotne jest dokładne określenie (z dokładnością do 1°C) temperatur, w jakich będą przebiegać poszczególne etapy wytwarzania piwa. Począwszy od zacierania, podczas którego enzymy pochodzące ze słodu wykazują wymagane działanie w określonej temperaturze, poprzez sterylizację brzeczki i masy filtracyjnej, skończywszy na ustaleniu dogodnych warunków fermentacji z uwzględnieniem dobranego szczepu drożdży – każde najmniejsze odchylenie od określonej temperatury może spowodować zmniejszenie wydajności, a nawet znaczące obniżenie jakości powstającego produktu, poprzez wytwarzanie się niechcianych związków.

Dostarczanie ciepła do poszczególnych obiektów browaru odbywa się przede wszystkim z wykorzystaniem pary nasyconej i przegrzanej (w mniejszych browarach za nośnik ciepła może posłużyć również gorący olej lub nawet ogrzewanie gazowe). Największe zapotrzebowanie na ciepło dotyczy przede

wszystkim warzelni, gdyż to w tym miejscu wysoka temperatura utrzymywana jest przez najdłuższy czas – brzeczka musi zostać doprowadzona do wrzenia i utrzymana w tym stanie do kilku godzin, aby możliwe było wykorzystanie wszystkich dobroczynnych dla jakości piwa właściwości chmielu. Na jeden hektolitr gotującej się brzeczki przewiduje się zużycie nawet 25 kg pary wodnej, co stanowi nawet jedną trzecią całkowitego ciepła wykorzystanego w całym procesie piwowarskim.

Przyjmuje się, że ogrzanie hektolitra wody do temperatury wrzenia wymaga ok. 20 kg pary, a na odparowanie – nawet 110 kg (tab. 1). Procesy zachodzące w warzelni zużywają niemal połowę całkowitego ciepła dostarczanego do browaru. Spory odsetek wykorzystywany jest również w trakcie zacierania oraz podczas mycia butelek. Na jeden hektolitr piwa estymuje się zużycie pary wynoszące do niemal 80 kg, a wpływ na tą wielkość ma głównie czas chmielenia. W wykorzystaniu ciepła należy również uwzględnić ogrzewanie i mycie pomieszczeń oraz niektóre procesy suszarnicze, które mogą towarzyszyć np. przy dalszym wykorzystywaniu wysłodzin pozostałych po zacieraniu [8].

Tabela 1. Przybliżone zużycie pary wodnej na poszczególne etapy produkcji piwa [8]

Zużycie pary wodnej [kg/hl]	
Zacieranie	10-14
Gotowanie brzeczki z chmielem	20-25
Mycie butelek	12-15
Inne (pasteryzacja, cele higieniczne itd.)	19-24
Razem	~61-78

4.2. Urządzenia chłodnicze

Ustalenie odpowiedniej temperatury dla kolejnych etapów procesu piwowarstwa wymaga nie tylko podnoszenia temperatury, ale również jej umiejętnego obniżania. Odpowiednio obniżona temperatura musi towarzyszyć m.in. magazynowaniu chmielu, który traci swoje cenne właściwości podczas niewłaściwego przechowywania. Należy także pamiętać o zapewnieniu odpowiednich warunków do przechowywania gotowego piwa. Zbyt wysoka temperatura może grozić rozszczelnieniem butelek. Wpływa też negatywnie na walory smakowe piwa i jego zapach. Niekiedy może nawet doprowadzić do wydzielenia się p-mentano-8-merkapto-3-onu – wówczas trunk nabiera zapachu kociego moczu i agrestu [9]. Chłodzeniu poddawana jest także brzeczka przed dodaniem do niej drożdży – oznacza to obniżenie temperatury hektolitrów wrzącego płynu do osiągnięcia warunków sprzyjających mikroorganizmom.

Zapotrzebowanie na chłód jest silnie uzależnione od warunków pogodowych. Pomieszczenie, w którym przebiega fermentacja, musi mieć temperaturę mieszczącą się w ściśle określonym zakresie, niekiedy poniżej 10°C. Przekroczenie tej temperatury nie pozwoli na uzyskanie piwa akceptowalnej jakości. Odpowiednio dobrana, niska temperatura towarzyszy również obciążeniu piwa i leżakowaniu.

Zapotrzebowanie na chłód w browarze można wyrazić w przeliczeniu na m² powierzchni pomieszczenia na dobę, wówczas w zależności od rozmiarów budynku istnieje możliwość oszacowania całkowitego zużycia. Najwięcej chłodu, bo nawet 35%, wykorzystuje się podczas chłodzenia brzezki po warzeniu. Drugim, ze względu na zużycie chłodu, jest etap fermentacji, podczas którego zużywa się 20% chłodu (tab. 2). Wielkość ta może ulegać znacznemu zwiększeniu podczas niesprzyjających temu procesowi warunków środowiskowych – latem trudniej jest utrzymać niską temperaturę w pomieszczeniu, a wówczas znaczący wpływ na zużytą do oziębienia energię ma m.in. grubość ścian budynku i jego izolacja [10].

Tabela 2. Przybliżone zapotrzebowanie na chłód na poszczególnych etapach produkcji piwa i w poszczególnych elementach browaru [10]

Etap produkcji, element browaru	Zapotrzebowanie na chłód	
	$\left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}\right]$	[%]
Chłodzenie fermentowni	1,05–1,40	10
Chłodzenie leżakowni	0,70–1,40	20
Chłodzenie obciążu piwa	1,74	15
Magazyn chmielu	0,35	3
Produkcja i magazyn sztucznego lodu	1,74	15
Chłodzenie brzezki	–	35

4.3. Instalacje elektrotechniczne

Oprócz zapotrzebowania na energię w celu regulacji temperatury, podczas produkcji piwa wykorzystuje się również zróżnicowane instalacje elektrotechniczne (tab. 3). W budynku browaru występują maszyny i urządzenia, takie jak pompy, mieszadła, sprężarki czy śrutowniki. Wraz ze wzrostem mechanizacji pracy w browarach, obserwuje się znaczny wzrost zużycia prądu elektrycznego. Największy pobór mocy dotyczy przede wszystkim rozlewu piwa i zwiększa się wraz z malejącą objętością naczynia. Najmniejszy nakład energii występuje w przypadku rozlewu piwa do kegow, a jest o wiele większy, gdy ta sama objętość jest rozlewana do butelek lub puszek [10].

Wskaźnikiem zużycia energii elektrycznej w browarze jest kWh/hl. Waha się on w granicach 6–8 kWh/hl, a zależy przede wszystkim od stop-

nia mechanizacji zakładu oraz sposobu, w jaki eksploatowane są urządzenia elektryczne.

Tabela 3. Przybliżone zapotrzebowanie na moc w poszczególnych elementach browaru

Etap produkcji, element browaru	Zapotrzebowanie mocy	
	$\left[\frac{\text{kWh}}{\text{hl}}\right]$	[%]
Magazyn słodu	0,07–0,09	1
Warzelnia	0,66–0,88	11
Obciąż butelkowy i beczkowy	0,66–0,88	11
Oświetlenie	0,48–0,56	8
Stacja pomp	0,42–0,56	7
Warsztaty	0,42–0,56	7
Fermentownia i leżakownia	0,30–0,40	5
Maszynownia	3–4	50
Razem	~6–8	100

5. Możliwości wdrożenia gospodarki cyrkularnej i wykorzystania odnawialnych źródeł energii w browarnictwie

W procesie produkcji piwa istnieje wiele możliwości wdrożenia elementów gospodarki cyrkularnej. Biorąc pod uwagę fakt, że podczas całego procesu duże ilości ciepła są przekazywane i odbierane od przygotowywanego produktu, można wykorzystywać parę pochodzącą z chłodzenia brzeczki w jednej części browaru do ogrzewania kotłów zaciernych lub warzelnii. Estymuje się, że podczas chłodzenia 1 hektolitra brzeczki można uzyskać do 70 l wody o temperaturze 60°C [10].

Oszczędność wody i przemysłana gospodarka odpadami to zjawiska, które coraz częściej można zaobserwować w browarach na całym świecie. W Amsterdamie do produkcji piwa wykorzystuje się uprzednio przefiltrowaną i wygotowaną wodę deszczową [12], natomiast w Kalifornii gromadzi się wodę pochodzącą z płukania aparatury i pozostawia się ją na wypadek suszy [13].

Istnieje też szeroka gama zastosowań dla pozostałych po zacieraniu wyśłodzin. Są one wykorzystywane między innymi w produkcji karmy dla ryb, bydła, a nawet batonów zbożowych spożywanych przez ludzi [14]. Wspomniany produkt odpadowy może być wykorzystany w celach energetycznych, zarówno jako surowiec do produkcji biogazu, jak i jako paliwo stałe po suszeniu lub hydrotermalnej karbonizacji [14].

W ostatnich latach rośnie wykorzystywanie odnawialnych źródeł energii. Ze względu na znaczne zapotrzebowanie na energię dużych koncernów piwowarskich, coraz popularniejsze staje się korzystanie z energii wiatrowej, wodnej i farm słonecznych. W roku 2014 browary Grupy Żywiec zaczęły czerpać aż 83% wykorzystywanej energii ze źródeł odnawialnych [15].

6. Podsumowanie

Browary to zdywersyfikowane zakłady przemysłu spożywczego. Od małych warzelnii restauracyjnych po ogromne zakłady, należące do międzynarodowych koncernów – wszystkie z nich muszą w swojej działalności uwzględnić zapotrzebowanie zarówno na energię elektryczną, jak i chłodzenie. Małe browary są często uzależnione od zewnętrznych dostawców energii, natomiast duże nierzadko posiadają własne kotłownie, dostarczające ciepło oraz parę wodną. W przypadku dużych zakładów szczególnie ważna jest racjonalna gospodarka energetyczna, między innymi poprzez wykorzystanie ciepła odpadowego. Nie wykluczone, że w nieodległej przyszłości coraz bardziej opłacalne okaże się inwestowanie we własne źródła energii odnawialnej.

Literatura

- [1] Dietrich O., Heun M., Notroff J., Schmidt K., Zarnkow M., *The role of cult and feasting in the emergence of Neolithic communities. New evidence from Göbekli Tepe, south-eastern Turkey*, *Antiquity* 2012, 86(333), 674–695. DOI: 10.1017/S0003598X00047840.
- [2] Valamoti S.M., *Brewing beer in wine country? First archaeobotanical indications for beer making in Early and Middle Bronze Age Greece*, *Vegetation History and Archaeobotany* 2018, 27(4), 611–625. DOI: 10.1007/s00334-017-0661-8.
- [3] Perruchini E., Glatz C., Hald M.M., Casana J., Toney J.L., *Revealing invisible brews: A new approach to the chemical identification of ancient beer*, *Journal of Archaeological Science* 2018, 100, 176–190. DOI: 10.1016/j.jas.2018.05.010.
- [4] Wiśniewski P., *Piwa historie niezwykłe*, Print Shops PREGO – Polska, Warszawa 1993.
- [5] Dylkowski W., *Technologia browarnictwa*, Wydawnictwo Przemysłu Lekkiego i Spożywczego, Warszawa 1963.
- [6] Jurado J., *A brief (and condensed) history of the beer can*, <https://beerandbrewing.com/a-brief-and-condensed-history-of-the-beer-can/> (dostępny 27.11.2020).
- [7] Esslinger H.M., *Handbook of Brewing*, Vol. 1, 2015.
- [8] Szymański M., *Polskie Piwo. Biografia. Historia lekko podchmielona*, Fronda, Warszawa 2018.

-
- [9] Mallet J., *Malt A practical guide from field to brewhouse*, Brewers Publications, Boulder 2014.
- [10] Briggs D.E., Brookes P.A., Stevens R., Boulton C.A., *(Book) Brewing: Science and Practice*, CRC Press, Boca Raton 2004.
- [11] Palmer J., Kaminski C., *Water a comprehensive guide for brewerse*, Brewers Publications, Boulder 2013.
- [12] Jackowski M., Niedzwiedzki L., Lech M., Wnukowski M., Arora A., Tkaczuk-Serafin M., Baranowski M., Krochmalny K., Veetil V.K., Seruga P., Trusek A., Pawlak-Kruczek H., *HTC of wet residues of the brewing process: Comprehensive characterization of produced beer, spent grain and valorized residues*, *Energies* 2020, 13(8), 2058. DOI: 10.3390/en13082058.
- [7] Kunze W., *Technologia piwa i sodu*, Piwochmiel, Warszawa 1999.
- [8] Hlaváček F., Lhotský A., *Piwowarstwo*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2020.
- [8] *Optimal fermentation temperature ranges by yeast strain*, <http://www.lugwrenchbrewing.com/2010/10/optimal-fermentation-temperature-ranges.html>, 2020.
- [9] *Jak przechowywa piwo? Rzecz o leżakowaniu* <https://piwolucja.pl/felietony/jak-przechowywac-piwo-lezakowanie/>, 2020.
- [10] Kaczmarek T., Rzemieniuk T., *Technologia browarnictwa*, Wydawnictwo Przemysłu Lekkiego i Spożywczego, Warszawa 1964.
- [11] Marks N., *Nakłady energii w procesie rozlewu piwa do beczek w browarze*, *Inżynieria Rolnicza* 2008, 6(104), 127–133.
- [12] *Amsterdam brewery turns rainwater into beer*, <https://www.springwise.com/amsterdam-brewery-turns-rainwater-beer/>
- [13] *The Californian craft beer brewed from waste water*, <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2016/mar/14/californian-craft-brewer-beer-recycled-water-environment>
- [14] *Beer in circular mode*, <https://www.livingcircular.veolia.com/en/eco-citizen/beer-circular-mode>
- [15] *Polskie piwo w 83 procentach produkowane z energii odnawialnej*, <https://www.gramwzielone.pl/trendy/10801/polskie-piwo-w-83-procentach-produkowane-z-energii-odnawialnej>