

사탕수수 부산물 펄프와 오일팜 줄기 펄프의 이산화염소 표백 특성

이재성 · 신수정[†]

접수일(2015년 7월 9일), 수정일(2015년 8월 6일), 채택일(2015년 8월 10일)

Chlorine Dioxide Bleaching Properties of Sugarcane Bagasse Pulp and Oil Palm Trunk Pulp

Jai-Sung Lee and Soo-Jeong Shin[†]

Received July 9, 2015; Received in revised form August 6, 2015; Accepted August 10, 2015

ABSTRACT

Soda-AQ pulp made from sugarcane bagasse (SCB) and oil palm trunk (OPT) were bleached in element chlorine free (ECF) sequence. Bleached SCB and OPT pulp was achieve higher brightness than 85.0% ISO. Viscosity of SCB bleached pulp and OPT bleached pulp were achieved 18-27 cPs and 18-26 cPs. In 7.8% active chlorine dioxide addition, bleached SCB pulp was shown 88.7% ISO brightness and 20.4 cPs viscosity. And bleached OPT pulp was shown 88.5% ISO brightness and 18.8 cPs viscosity with 7.8% active chlorine dioxide addition.

Keywords: ECF bleaching, brightness, chlorine dioxide, oil palm trunk, sugarcane bagasse

• 충북대학교 목재종이과학과(Department of Wood and Paper Science, Chungbuk National University, Chungbuk, 28644, Korea)

† 교신저자(Corresponding Author): E-mail: soojshin@cbnu.ac.kr

1. 서론

목재 자원을 주로 사용하는 펄프 제지 공정에서 목재 자원 부족 해결과 환경 보전을 위해 다양한 비 목재 섬유를 재료로 하는 공정이 시도되고 있다.¹⁾ 비 목재 섬유는 기존의 목재원료와 비교하여 화학적 성분 함량이 다르기 때문에 목재 재료를 사용할 때와 펄핑이나 표백 공정이 달라질 수 있다.²⁾

사탕수수는 그 줄기에 존재하는 당분이 식용 목적 뿐 아니라 바이오 에너지원으로 활용된다.³⁾ 사탕수수의 생산량은 매년 증가 추세이며, 사탕수수의 당분이 제거된 부산물인 사탕수수 부산물의 발생량도 증가하고 있다.⁴⁾ 또한 열대산 외떡잎식물의 일종인 오일팜은 그 열매에서 채취하는 팜유의 수요가 증가하고 있어서 식재량이 증가하고 있다.⁵⁾ 하지만 오일팜의 수명이 20-25년이 지나면서 오일 생산성이 급격한 하락하여 오일팜을 베어내고 새로운 오일팜을 다시 식재하여⁶⁾ 매년 많은 양의 오일팜 줄기가 발생 한다.⁷⁾ 비 목재 섬유인 사탕수수 부산물과 오일팜 줄기는 증가하고 있는 발생량에 비해 처리방법이 제한되어 있어 이런 방법으로 처리할 수 있는 양에 한계가 있다.⁸⁾ 사탕수수 부산물과 오일팜 줄기와 같은 비 목재 섬유를 펄프 제지 공정에 이용한다면 목재 자원절감 효과를 기대할 수 있다.⁹⁾

리그닌은 화학펄프 공정으로 대부분 제거되지만 잔류 리그닌에 의해 미표백 펄프의 백색도는 높지 않다. 따라서 높은 백색도를 요구하는 지종을 위해 표백 공정을 통해 잔류 리그닌이나 다른 발색구조를 갖는 물질들을 제거해야 한다.¹⁰⁾ 표백공정은 일반적으로 염소계 화합물¹¹⁾과 산소계 화합물¹²⁾을 산화제로 사용한다. 1970년대 이전까지는 염소를 이용한 표백이 주를 이루었지만¹³⁾ 환경 오염에 대한 관심이 증가하면서 폐수 처리가 곤란한 일부 염소계 화합물의 사용이 제한되고 있다.¹⁴⁾ 특히 염소 표백 후의 폐수 방류 시 표백 폐수에서 기원하는 독성물질이 어류에 축적되고 생태계 사슬을 통하여 그 어류를 섭취한 사람에게 발암물질로 작용 한다.¹⁵⁾ 1970년대 이후 염소 표백 공정(C)에 소량 첨가하는 펄프 점도 향상을 위한 라디칼 감소를 목적으로 하는 첨가제로 이산화염소가 처음 등장하였다.¹⁶⁾ 이후 1980년대 후반부터 환경 문제를 야기하는 할로젠계 유기화합물(Absorbable Organic Halogens, AOX)에 대한 관심이 증대되면서 1993년 미국 환경 안전청에서 펄프 공장에 대한 오염 물

질 배출량을 규제하였다. 표백 공정 후의 AOX 배출량을 규제치 이하로 줄이기 위하여 염소와 이산화염소를 함께 혼합하여 사용하는 (CD) 형태의 표백 공정이 사용되었다. 규제가 강화되어 감에 따라 이산화염소의 사용량이 염소 사용량을 대체하는 양이 증가하였으며 이산화염소의 비율이 더 높은 (DC) 형태의 표백 공정이 등장하였다. 이후 염소를 사용하는 표백공정은 사라지고 최근의 표백 공정은 어떠한 형태의 염소도 사용, 발생하지 않는 Total Chlorine Free(TCF) 공정¹⁷⁾과 인체에 특히 유해한 하이포아염소산과 염소가 사용, 발생하지 않는 Element Chlorine Free(ECF) 공정¹⁸⁾으로 구분된다.

ECF 공정 중 이산화염소 표백(D)은 이산화염소에 의해 리그닌 폴리머에서 분해된 리그닌들을 효과적으로 제거하고 분해된 리그닌에 산화제가 소모되는 것을 방지하기 위해 알칼리 추출 단계(E)를 추가한다. TCF와 비교하여 저비용의 산화제 및 단순한 공정을 통해 효과적인 표백이 가능하며 다른 염소계 표백제에 비해 염소계 유기화합물의 발생이 적다.¹⁹⁾

본 실험에서는 비 목재 섬유를 이용하여 제조한 표백 펄프가 기존의 목재 기반 표백 펄프를 대체할 수 있는지 확인하기 위하여 비 목재 섬유인 사탕수수 부산물과 오일팜 줄기로 제조한 펄프를 DEDED 표백 후 백색도와 점도를 측정하여 표백특성을 관찰하였다. 표백 단계 별 활성이산화염소량을 조절 하여 표백을 실시하여 원하는 수준의 백색도와 점도를 얻을 수 있는 적절한 표백제 사용량을 확인하였다. 또한 각 펄프의 화학적 조성과 표백 완료 후 화학조성을 분석하여 펄프 내 탄수화물 변화를 관찰하였다.

2. 재료 및 방법

인도네시아에 위치한 C기관에서 제조한 사탕수수 부산물과 오일팜 줄기의 soda-AQ 펄프(Table 1)를 공시재료로 사용하였으며 표백 전 카파 값을 측정하였다(Table 2).

2.1 표백

백색도를 높이고 섬유 손상을 줄이는 표백 조건을 탐색하기 위해 각 D 단계별 산화제 양과 E 단계 수산화나트륨 첨가량을 조절하였다(Table 3).

Table 1. Cooking conditions of soda AQ process

| Parameter | Cooking condition |
|----------------------------------------|----------------------------------|
| Temperature (°C) | 160 |
| Wood to Liquor Ratio | 1:5 |
| Anthraquinone (%) | 0.1 |
| Active Alkali as Na ₂ O (%) | 10 ^a /17 ^b |
| Time to maximum temperature (min) | 120 |
| Time at maximum temperature (min) | 90 |

^a Sugarcane bagasse
^b Oil palm trunk

Table 2. Kappa number of sugarcane bagasse soda-AQ pulp and oil palm trunk soda-AQ pulp

| | Sugarcane bagasse | Oil palm trunk |
|--------------|-------------------|----------------|
| Kappa number | 27.76 | 15.50 |

2.1.1 D₀ 단계

사탕수수 부산물 펄프와 오일팜 줄기 펄프를 10.0% 농도로 준비하여 5.0, 6.0%(w/w o.d.p.)의 활성이산화염소가 생성될 수 있도록 아염소산나트륨과 아세트산을 첨가하였다. 아세트산에 의해 pH는 3.5로 조정되었다. 비닐 백에 넣어 충분히 교반된 상태에서 밀봉하여 미리 75.0°C로 준비된 향온수조에서 1시간 동안 반응하였다. 반응을 마친 후 증류수를 이용하여 펄프 현탁액 내의 화학약품을 모두 세척, 여과하여 10.0% 이상의 농도를 유지한 후 다음 단계를 준비하였다.

2.1.2 E 단계

D₀ 단계를 거친 펄프를 10.0% 농도로 희석하여 D₀ 단

계에서 사용된 활성이산화염소량의 절반에 해당하는 무게의 가성소다를 첨가하였다. 충분히 교반 된 상태에서 비닐 백을 밀봉하여 미리 75.0°C로 준비된 향온수조에서 1시간 동안 반응하였다. 반응을 마친 후 증류수를 이용하여 펄프 현탁액 내의 화학약품을 모두 세척, 여과하여 10.0% 이상의 농도를 유지한 후 다음 단계를 준비하였다.

2.1.3 D₁ 단계

알칼리 추출 단계를 거친 펄프를 10.0% 농도로 준비하여 1.0, 1.5%(w/w o.d.p.)의 활성이산화염소가 생성될 수 있도록 아염소산나트륨과 아세트산을 첨가하였다. 아세트산에 의해 pH는 3.5로 조정되었다. 비닐백에 넣어 충분히 교반된 상태에서 밀봉하여 미리 75.0°C로 준비된 향온수조에서 1시간 동안 반응하였다. 반응을 마친 후 증류수를 이용하여 펄프 현탁액 내의 화학약품을 모두 세척, 여과하여 10.0% 이상의 농도를 유지한 후 다음 단계를 준비하였다.

2.1.4 E 단계

D₁ 단계를 거친 펄프를 10.0% 농도로 희석하여 D₀ 단계에서 사용된 활성이산화염소량의 절반에 해당하는 무게의 가성소다를 첨가하였다. 충분히 교반 된 상태에서 비닐 백을 밀봉하여 미리 75.0°C로 준비된 향온수조에서 1시간 동안 반응하였다. 반응을 마친 후 증류수를 이용하여 펄프 현탁액 내의 화학약품을 모두 세척, 여과하여 10.0% 이상의 농도를 유지한 후 다음 단계를 준비하였다.

2.1.5 D₂ 단계

알칼리 추출 단계를 거친 펄프를 10.0% 농도로 준비

Table 3. Bleaching conditions in the different stages

| | D ₀ | E | D ₁ | E | D ₂ |
|-----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Consistency (% on o.d.p. ^a) | | | 10 | | |
| Temperature (°C) | | | 75 | | |
| Reaction time (min) | | | 60 | | |
| Agent charge (% on o.d.p.) | 5.0 ^b /6.0 ^b | 2.5 ^c /3.0 ^c | 1.0 ^b /1.5 ^b | 0.5 ^c /0.75 ^c | 0.3 ^b /0.5 ^b |

^a Oven-dry pulp
^b As active chlorine dioxide
^c As sodium hydroxide

하여 0.3, 0.5%(w/w o.d.p.)의 활성이산화염소가 생성될 수 있도록 아염소산나트륨과 아세트산을 첨가하였다. 아세트산에 의해 pH는 4.5로 조정되었다. 비닐 백에 넣어 충분히 교반된 상태에서 밀봉하여 미리 75.0℃로 준비된 항온수조에서 1시간 동안 반응하였다. 반응을 마친 후 증류수를 이용하여 펄프 현탁액 내의 화학약품 모두 세척, 여과하였다.

2.2 표백 특성 분석

2.2.1 펄프 섬유 조성 분석

표백 전후의 사탕수수 부산물 펄프, 오일팜 줄기 펄프와 표백 후의 2중 펄프의 당 조성을 분석하여 표백 과정 간 셀룰로오스 및 헤미셀룰로오스의 조성 변화를 확인하였다. 각 시료 0.040 g을 30.0℃에서 72.0%(w/w) 황산 0.6 mL를 첨가하여 잘 교반한 후 60 분간 반응시켜 1차 가수분해를 실시 한 후 중수 3.0 mL를 첨가하여 산 농도를 희석 후 100.0℃에서 60 분간 2차 가수분해를 실시하였다. 여과지를 이용하여 당화액을 여과하고 진한 황산을 첨가하여 chemical shift를 조절, 물에 해당하는 피크 영역이 아노머성 수소 피크 영역을 가리는 것을 방지하였다. 모든 처리를 마친 당화액은 500 MHz 핵자기 공명분광기(Avance 500 MHz, Bruker, Germany)를 통해 분석하였다.²⁰⁾ Bruker사의 Topspin 프로그램을 이용하여 아노머성 수소 피크 영역의 적분을 통해 단당 조성 파악을 통해 표백 전후 섬유 조성을 비교하였다.

2.2.2 백색도 측정

샘플별 표백 효과를 측정하기 위해 TAPPI 205에 의거하여 펄프 수조지를 제작, TAPPI 525에 의거하여 백색도를 측정하였다. DE 단계, DEDE 단계의 백색도를 측정하여 표백 단계별 백색도 변화를 측정하였으며 DED-ED 단계 후 최종 백색도를 측정하였다.

2.2.3 점도 측정

표백공정별 표백약품에 의한 섬유의 손상 정도를 알아보고자 TAPPI 230의 방법에 의거하여 캐논-펜스케 점도계(Canonon-fenske routine, Cannon instrument company, USA)를 이용하여 점도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 표백 전후 섬유 조성 분석

표백 전후의 사탕수수 부산물 펄프와 오일팜 줄기 펄프의 탄수화물 조성을 분석하기 위해 ¹H-NMR 분석을 실시하였다. 표백 후의 펄프는 가장 강한 조건의 표백 펄프를 사용하여 분석 하였다(Table 4).

유칼립투스를 재료로 하는 펄프를 이산화염소 표백하였을 때 나타나는 결과²¹⁾와 마찬가지로 이산화염소 표백 공정 시 pH와 온도 조건에 의해 자일란의 가수분해가 약간 발생하여²¹⁾ 사탕수수 부산물 펄프와 오일팜 줄기 펄프 모두 표백 이후의 글루코오스의 함량이 증가하였으며 자일란의 함량이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며 이러한 경향은 오일팜 줄기 펄프에 비해 사탕수수 부산물 펄프에서 더 뚜렷한 경향을 나타내었다. 자일란 함량 감소에 따라 표백 효과의 향상이 나타난다고 알려져 있지만 본 표백 실험에서는 효소와 같은 추가적인 처리를 통해 자일란 함량이 확연하게 줄어들지 않아 자일란 함량 감소로 인한 백색도 향상 효과는 크게 영향이 없다고 판단된다. 사탕수수 부산물 펄프에서는 오일팜 줄기 펄프에서 발견되지 않는 아라비노오스가 발견되었다.

3.2 백색도 측정

사용된 활성이산화염소 양에 따라 차이가 있지만 사탕수수 부산물 펄프와 오일팜 줄기 펄프 모두 DEDED 표

Table 4. Carbohydrate composition by NMR (anomeric hydrogen integration only) for SCB pulp, OPT pulp and bleached SCB pulp, bleached OPT pulp

| | | Glucose (%) | Xylose (%) | Mannose (%) | Galactose (%) | Arabinose (%) |
|-----|------------|-------------|------------|-------------|---------------|---------------|
| SCB | Unbleached | 68.11 | 27.51 | 0.71 | 2.03 | 1.65 |
| | Bleached | 71.25 | 26.11 | 0.29 | 1.41 | 0.94 |
| OPT | Unbleached | 70.38 | 27.46 | 0.38 | 1.77 | 0 |
| | Bleached | 70.53 | 26.81 | 0.74 | 1.91 | 0 |

백을 통하여서 88% ISO에 가까운 최종 백색도 값을 얻을 수 있었다(Fig. 1).

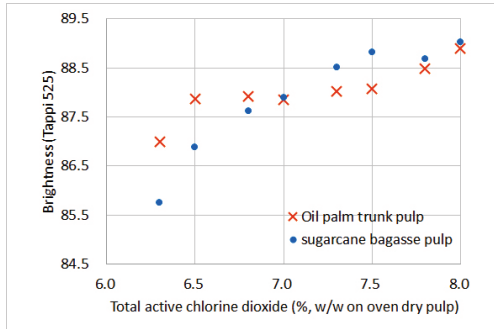


Fig. 1. Brightness of bleached pulp versus total active chlorine dioxide.

오일팜 줄기 펄프는 사탕수수 부산물 펄프와 비교하여 7.0% 이하의 활성이산화염소 조건에서는 높거나 비슷한 백색도를 나타내었지만 활성이산화염소 사용량이 7.0%를 초과하는 조건부터 사탕수수 부산물 펄프의 백색도가 더 높게 나타났다. 최종 백색도 뿐 아니라 표백 단계별 백색도를 비교하였을 때도 오일팜 줄기 펄프(Fig. 2)는 적은 양의 활성이산화염소 조건에서 사탕수수 부산물 펄프(Fig. 3)보다 높은 백색도를 나타내었지만 더 많은 양의 활성이산화염소를 사용하는 조건에서는 사탕수수 부산물 펄프가 더 높은 백색도를 나타냈다.

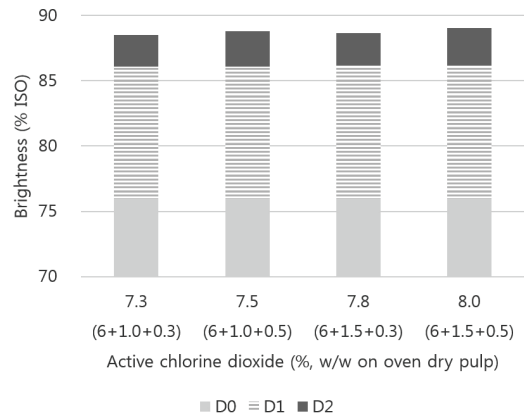
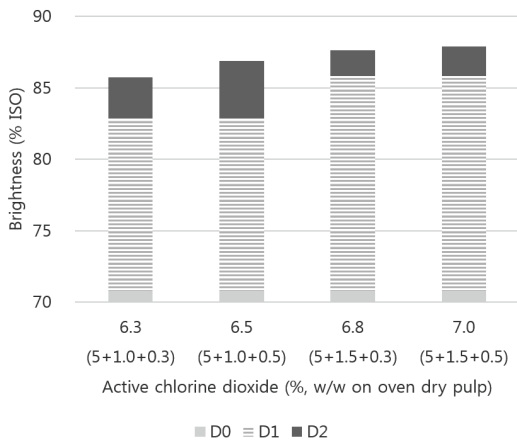


Fig. 2. Brightness of SCB pulp in each bleaching stage.

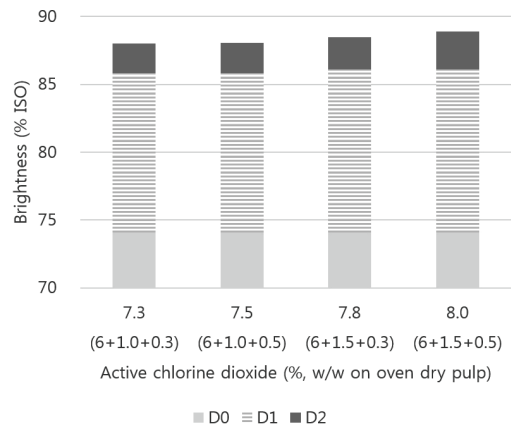
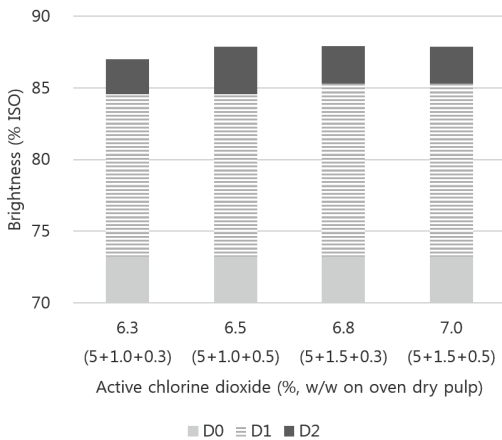


Fig. 3. Brightness of OPT pulp in each bleaching stage.

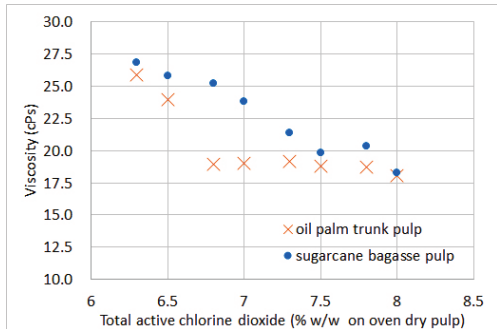


Fig. 4. Viscosity of bleaching pulp versus total active chlorine dioxide.

3.3 점도 측정

최종 표백 후 샘플별 펄프 점도 측정을 실시하였다 (Fig. 4). 두 종류의 샘플 펄프 모두 표백 정도에 따라서 점도가 감소하였다.

사탕수수 부산물 표백펄프와 오일팜 줄기 표백펄프가 현재 상용되어 지고 있는 표백 펄프를 대체할 수 있을지 확인하기 위해 국내 H사에서 사용되는 유칼립투스 표백 크라프트 펄프, 웨스턴 헴록과 웨스턴 레드시더의 표백 크라프트 펄프의 물성 자료와 비교하였다. 국내 H사에서 사용되는 수입 표백 크라프트 펄프는 활엽수 펄프가 18-20 cPs, 침엽수 펄프는 20 cPs인 것에 비해²²⁾, 사탕수수 부산물 표백펄프의 경우 총 활성이산화염소 7.8% 사용 조건에서 점도는 20.4 cPs, 백색도는 88.7% ISO로 활엽수, 침엽수 표백 크라프트 펄프와 비교하여 유사하거나 더 좋은 물성을 나타냈다.

오일팜 줄기 표백펄프의 경우 사탕수수 부산물 표백펄프보다 활성이산화염소 첨가량이 증가함에 따라 점도 감소가 더 낮은 농도의 이산화염소에서 나타났다. 하지만 활성이산화염소 첨가량이 7.5% 이상인 경우 오일팜 줄기 부산물 표백 펄프와 사탕수수 부산물 펄프의 점도 차이는 미미하였다. 오일팜 줄기 표백펄프는 총 활성이산화염소가 6.8-7.8%인 경우 점도는 18.8-19.1 cPs, 백색도는 87.91-88.48% ISO로 점도 특성을 고려하였을 때 활엽수 표백 크라프트와 비교하여 유사한 물성을 나타냈다.

4. 결론

본 연구에서는 오일팜 줄기와 사탕수수 부산물 펄프를

이용하여 DEDED 표백을 진행한 후 표백 특성과 표백 후 섬유 특성을 분석하였으며 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 사탕수수 부산물 펄프와 오일팜 줄기 펄프를 DED-ED 표백하였을 때 사탕수수 부산물 펄프의 경우 85.5% ISO 이상 오일팜 줄기 펄프의 경우 87.0% ISO 이상의 백색도를 얻을 수 있었다. 특히 88% ISO 이상의 고백색도 표백이 필요한 경우는 사탕수수 부산물 펄프를 사용하였을 때 효과적이며 상대적으로 적은 양의 활성이산화염소를 투입할 경우 오일팜 줄기 펄프를 사용하는 것이 적합하다.
2. 점도 분석 결과 본 연구에서 88% ISO 근처의 높은 백색도를 얻을 수 있는 표백 조건에서도 사탕수수 부산물 표백펄프와 오일팜 줄기 표백펄프의 점도가 상용되는 활엽수, 침엽수 표백 크라프트 펄프와 비교하여 유사하거나 더 높은 값을 나타냈다.
3. 위의 결과들을 종합하였을 때 사탕수수 부산물과 오일팜 줄기를 재료로 하는 표백 펄프의 특성을 활엽수 상용 표백 크라프트 펄프 또는 침엽수 상용 표백 크라프트 펄프와 비교하여 상용 크라프트 펄프를 대체할 수 있는 가능성이 있다.

사 사

본 연구는 아시아나셀룰로오스(주)의 지원을 받아서 수행하였습니다.

Literature Cited

1. Sood, Y. V., Tyagi, R., Tyagi, S., Pande, P. C., and Tondon, R., Surface charge of different paper making raw materials and its influence on paper properties, *J. Sci. Ind. Res.* 69:300-304 (2010).
2. Lei, Y., Liu, S., Li, J., and Sun, R., Effect of hot-water extraction on alkaline pulping of bagasse, *Biotechnol. Adv.* 28:609-612 (2010).
3. Waclawovsky, J. A., Sato, P. M., Lembke, C. G., Moore, P. H., and Souza, G. M., Sugarcane for

- bioenergy production: An assessment of yield and regulation of sucrose content, *Plant Biotechnol. J.* 8(3):263–276 (2010).
4. Uriarte, M., Yackulic, C. B., Cooper, T., Flynn, D., Cortes, M., Crk, T., Cullman, G., McGinty, M., and Sirely, J., Expansion of sugarcane production in Sao Paulo, Brazil: Implications for fire occurrence and respiratory health, *Agric. Ecosyst. Environ.* 132(1–2):48–56 (2009).
 5. Sumathi, S., Chai, S. P., and Mohamed, A. R., Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia, *Renewable Sustainable Energy Rev.* 12(9):2404–2421 (2008).
 6. Husin, M., Zakaria, Z. Z., and Hassan, A. H., Potentials of oil palm by-products as raw materials for agro-based industries, *PORIM.* 11:7–15 (1985).
 7. Kosugi, A., Tanaka, R., Magara, K., Murata, Y., Arai, T., Sulaiman, O., Hashim, R., Hamid, Z. A. A., Yahya, M. K. A., Yusof, M. N. M., Ibrahim, W. A., and Mori, Y., Ethanol and lactic acid production using sap squeezed from old oil palm trunks felled for replanting, *J. Biosci. Bioeng.* 110(3):322–325 (2010).
 8. Foo, K. Y. and Hameed, B. H., Value-added utilization of oil palm ash: A superior recycling of the industrial agricultural waste, *J. Hazard. Mater.* 172(2–3):523–531 (2009).
 9. Lim, H., Kang, C., and Lee, Y., The effects of base papers containing nonwood pulp on the properties and printability of coated paper (1), *Journal of Korea TAPPI* 32(3):39–47 (2000).
 10. Sigoillot, C., Camarero, S., Vidal, T., Record, E., Asther, M., Perez-Boada, M., Martinez, M. J., Sigoillot, J., Asther, M., Colom, J. F., and Martinez, A. T., Comparison of different fungal enzymes for bleaching high-quality paper pulps, *J. Biotechnol.* 115(4):333–343 (2005).
 11. Carvalho, M. G. V. S., Carvalho, N. M. V., and Loureiro, P. E. G., Performance of a final hydrogen peroxide stage in the ECF bleaching of *Eucalyptus D₀E_{0p}D₁* kraft pulps, *Tappi J.* 7:8–13 (2008).
 12. Abrantes, S., Amaral, E., Costa, A. P., Shatalov, A. A., and Duarte, A. P., Hydrogen peroxide bleaching of *Arundo donax L.* kraft-anthraquinone pulp – Effect of a chelating stage, *Ind. Crops Prod.* 25:288–293 (2007).
 13. Kringstad, K. P. and Lindstrom, K., Spent liquors from pulp bleaching, *Environ. Sci. Technol.* 18(8):236–248 (1984).
 14. Savant, D. V., Abdul-Rahman, R., and Ranade, D. R., Anaerobic degradation of adsorbable organic halides (AOX) from pulp and paper industry wastewater, *Bioresour. Technol.* 97(9):1092–1104 (2006).
 15. Fukazawa, H., Hoshino, K., Shiozawa, T., Matsumushita, H., and Terao, Y., Identification and quantification of chlorinated bisphenol A in wastewater from wastepaper recycling plants, *Chemosphere* 44:973–939 (2001).
 16. Liss-Albin, C. I., Oskar, D. S., and Erik, N. S., Bleaching and delignification of partially delignified pulp with a mixture of chlorine and chlorine dioxide, US patent, US3652388 A (1972).
 17. Ahn, C., Seo, J., Kim, H., and Chung, S., Evaluation of brightness and environmental load by hydrogen peroxide bleaching conditions of TMP, *Journal of Korea TAPPI* 46(3):20–27 (2014).
 18. Seco, I. M. C., Neto, C. P., and Silvestre, A. J. D., Strategies to reduce the brightness reversion of industrial ECF bleached *Eucalyptus globulus* kraft pulp, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 83:218–226 (2008).
 19. Axegard, P. and Renberg, L., The influence of bleaching chemicals and lignin content

- on the formation of polychlorinated dioxins and dibenzofurans, *Chemosphere* 19:661-668 (1989).
20. Lee, J. and Shin, S., Analysis of secondary reactions in concentrated sulfuric acid hydrolysis of hollocellulose by ^1H -NMR spectroscopy, *Journal of Korea TAPPI* 46(3):37-43 (2014).
21. Torres, A. L., Roncero, M. B., Colom, J. F., Pastor, F. I. J., Blanco, A., and Vidal, T., Effect of a novel enzyme on fiber morphology during ECF bleaching of oxygen delignified Eucalyptus kraft pulps, *Bioresour. Technol.* 74:135-140 (2000).
22. Lee, M. W., Park, J. K., Park, D. H., and Seo, Y. B., Comparison of cellulose DP measurements using the CED (Cupriethylenediamine) and NMMO (N-methylmorpholine-N-oxide), *Journal of Korea TAPPI* 42(5):62-66 (2010).